

Rivista svizzera di architettura,
ingegneria e urbanistica
Schweizerische Zeitschrift für Architektur,
Ingenieurwesen und Stadtplanung

2 2018

Spazi per la musica

Bauten für die Musik

TESTI TEXTE

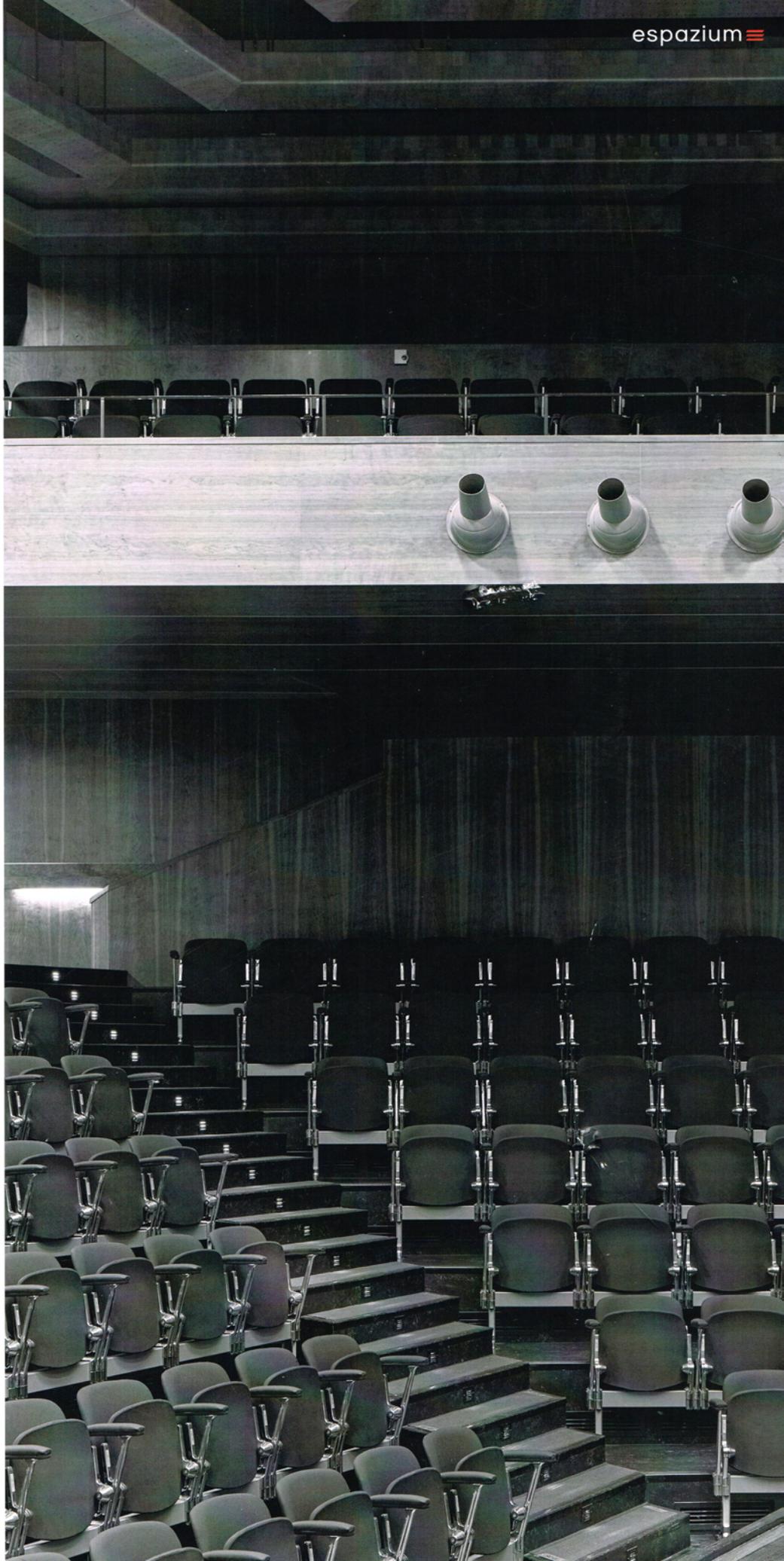
- Hubertus Adam
- Vovka Ashkenazy
- Andrea Bacchi Mellini
e Andrea Roscetti
- Silvia Berselli
- Vincent Chritin
- Roberto Favaro
- Nicola Navone
- Jürgen Reinhold
- Etienne Reymond
- Carmelo Rifici

PROGETTI PROJEKTE

- Shigeru Ban, Jean de Gastines
- Alberto Camenzind, Augusto Jäggi
e Rino Tami
- Ivano Gianola
- Jean Nouvel
- Renzo Piano
- Herzog & de Meuron

sia

A Mendrisio l'Assemblea
dei delegati SIA



espazium 

Der Verlag für Baukultur
Les éditions pour la culture du bâti
Edizioni per la cultura della costruzione

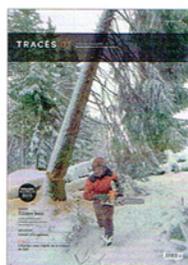
Con **TEC21**, **TRACÉS**, **Archi**
e la piattaforma comune
www.espazium.ch
creiamo uno spazio di
riflessione sulla cultura
della costruzione.

Dai progettisti per i progettisti!
Spazio interdisciplinare,
interculturale, specialistico,
indipendente e critico.

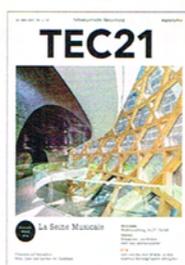
TEC21 TRACÉS archi

Nel prossimo numero:
«L'ingegneria di Giovanni Lombardi»

Dello stesso editore:



Tracés n.07
Filière bois
espazium.ch/traces



Tec21 n.12-13
La Seine Musicale
espazium.ch/tec21



Lavatrici e libertà
Una video-visita alla cooperativa abitativa Kraftwerk1
Hardturm di Zurigo.
espazium.ch/archi

Si ringrazia la RSI Radiotelevisione svizzera,
per la cortese collaborazione e disponibilità

arch

n.2 aprile

- 3 EXPROMO a cura di Federica Botta
- 10 INTERNI E DESIGN a cura di Gabriele Neri
- 13 ACCADEMIA DI ARCHITETTURA AAM
a cura di Graziella Zannone Milan
- 17 SCUOLA UNIVERSITARIA PROFESSIONALE SUPSI
a cura di Manuel Lüscher
- 20 CULTURA DELLA COSTRUZIONE a cura di Silvia Berselli
- 23 NOTIZIE TI a cura di Stefano Milan

Spazi per la musica

Bauten für die Musik

a cura di Silvia Berselli e Andrea Roscetti

- 31 **EDITORIALE I VENT'ANNI DI ARCHI E LA TRADIZIONE DEL NUOVO**
Mercedes Daguerre
- 34 **EDIFICI CHE CANTANO E ALTRI SPAZI SONORI**
Roberto Favaro
- 40 **LA FORMA DEL SUONO**
Silvia Berselli
- 46 **GENESI DELL'ACUSTICA DI UNA SALA SINFONICA**
Vincent Chritin
- 51 **LA PERCEZIONE DEL MUSICISTA**
Vovka Ashkenazy
- 56 **IL LAC DI LUGANO**
Ivano Gianola
Testi di Carmelo Rifichi, Etienne Reymond, Jürgen Reinhold
- 64 **IL KKL DI LUCERNA**
Jean Nouvel
Testo di Andrea Bacchi Mellini e Andrea Roscetti
- 70 **IL PAUL KLEE ZENTRUM DI BERNA**
Renzo Piano
Testo di Andrea Bacchi Mellini e Andrea Roscetti
- 74 **ELBPILHARMONIE DI AMBURGO**
Herzog & de Meuron
Testo di Andrea Bacchi Mellini e Andrea Roscetti
- 80 **LA SEINE MUSICALE DI PARIGI**
Shigeru Ban, Jean de Gastines
Testi di Hubertus Adam, Andrea Bacchi Mellini e Andrea Roscetti
- 86 **L'AUDITORIO STELIO MOLO DI LUGANO**
Alberto Camenzind, Augusto Jäggl e Rino Tami
Testo di Nicola Navone
- 92 COMUNICATI SIA a cura di Frank Peter Jäger
- 99 COMUNICATI OTIA a cura di Daniele Graber
- 101 APPUNTAMENTO CON L'INGEGNERIA a cura di Stefano Milan
- 104 CRONACHE DI PENTESILEA a cura di Sara Groisman
- 107 LIBRI a cura di Mercedes Daguerre
- 108 PROGETTI TI a cura di Teresa Volponi
- 119 CONCORSI TI a cura di Teresa Volponi



Complementi al tema
www.espazium.ch/archi2-18_links

In copertina: Alberto Camenzind, Augusto Jäggl e Rino Tami,
L'Auditorio Stelio Molo RSI a Lugano-Besso. Foto Marcelo Villada Ortiz

Genesi dell'acustica di una sala sinfonica

Misurazioni, test, simulazioni

Vincent Chritin

Dottore in scienze acustiche, LEMA / EPFL

Senza nulla togliere al prezioso contributo di Bruno Gandet, l'auditorium Stravinski del Centro di Congressi & Musica di Montreux è il capolavoro del compianto Mario Rossi. Nel luglio 2016 il suo sassofono ha smesso definitivamente di suonare. Per vent'anni il professor Rossi è stato il «Super Mario» dell'acustica dell'EPFL: questo era il suo soprannome all'interno del laboratorio, anche se lui fingeva di non saperlo. Lui che ha tanto amato e condiviso con noi, suoi studenti e assistenti, la scienza dell'acustica applicata, in particolar modo quando questa era finalizzata alla puntuale riproduzione di suoni, musica e parole in un'unica sala. Riverberi, riflessioni, echi, pareti, nitidezza, intelligibilità, sonorizzazione: un vocabolario a sé stante, costantemente articolato, rielaborato e definito ricercando un equilibrio dinamico tra il livello teorico e quello pratico; un universo fatto di misurazioni, test, esperimenti, calcoli, simulazioni ed elaborazioni: l'universo della cosiddetta «acustica ambientale». In francese spesso troviamo il termine «acustica» scritto con due «c» - *accoustique* - come per sottolineare che in questa scienza c'è sempre qualcosa di controverso e ingannevole. In inglese, bisogna sempre fare un piccolo sforzo per ricordarsi quella famosa «s» finale che distingue il nome - *acoustics* - dall'aggettivo. Stesso discorso vale per la parola «algoritmo», che spesso in francese si incontra scritta con una «y» - *algorithme* - come per dargli un po' di ritmo. Ma poi l'occhio percepisce che qualcosa non quadra. Che dire infine del logaritmo, fondamento del più noto decibel, che distingue il tecnico acustico esperto da quello modesto, che non saprà mai perché in acustica moltiplicando per due si ottiene tre, a volte sei, a seconda di quanto le onde sonore siano effettivamente in fase.

Decibel, livelli, intensità, potenza, frequenze, ampiezza, fase, spettri e infine «cepstrum»¹: diamine, ecco finalmente i termini tecnici che permettono di collocare l'esperto di acustica, equiparandolo a quello di fisica, in un'area estranea all'ascoltatore medio. Circa trent'anni fa, all'epoca del primo Macintosh con lettore floppy disk e di Windows 3.1, quando le simulazioni acustiche nei software di progettazione non erano ancora possibili se non in forma rudimentale, per sperare di ottenere una buona acustica in uno spazio da concerto e ancor più in una sala sinfonica destinata a divenire un punto di riferimento quantomeno a livello regionale, era indispensabile la figura dell'esperto di acustica, con tutta la sua incomparabile preparazione e conoscenza delle qualità del suono. Allo stesso modo, e per ragioni simili, era necessario un altro personaggio, anche lui avvolto nell'alone di prestigio della sua categoria: l'architetto, figura centrale in ogni progetto, perché senza di lui uno studio acustico non può neanche iniziare a lavorare, a causa della mancanza di uno scenario da valutare.

Era il 1990. Presso il laboratorio LEMA-EPFL il professor Mario Rossi descrive a me e al collega Walter Köller, suoi assistenti, la nuova impresa che ci attende. Si tratta della progettazione dell'auditorium di Montreux.² Ci riassume le problematiche e gli obiettivi in parole semplici: «Abbiamo un progetto entusiasmante chiamato "MC3", nome provvisorio della futura sala sinfonica di Montreux. C'è già a disposizione uno studio preliminare, realizzato dal signor Grandet, l'esperto di acustica della Baechli a Baden. La prima difficoltà da tenere in considerazione è la forma molto ampia e la notevole altezza della sala, distante dal modello acustico ideale "a scatola di scarpe". Per questa forma saranno necessari 10 mc di volume per ogni spettatore, come stabilisce lo studio preliminare sul riverbero naturale. D'altro canto questo tipo di struttura rispetta tutti gli altri vincoli architettonici non acustici, in particolare la visibilità e i requisiti estetici. La seconda difficoltà è che l'acustica dovrà essere ottimale qualunque sia il tasso di occupazione della stanza, quindi da quasi vuota a piena. Il terzo è che la sala dovrà essere multifunzionale. Pertanto il sistema acustico dovrà essere adatto a complessi di musica classica, ma anche jazz, rock, musica da camera e fanfare, nonché a conferenze e mostre, congressi ed eventi aziendali, senza tralasciare commedie e balletti. Questi vincoli sono imprescindibili e l'acustica deve essere eccellente, a "18 carati", naturale per la musica sinfonica e integrata da un sistema sonoro elettroacustico per negli altri casi. In sintesi i nostri dati fondamentali sono: un volume di 18'000 mc, una capacità di 1800 posti a sedere e dimensioni interne già stabilite».

Il problema era quindi quello di ottenere un'acustica naturale ottimale a partire da una larghezza e un'altezza molto elevate, includendo la possibilità di ampie variazioni circa il grado di occupazione della sala e dando modo di cambiare le postazioni sul palco (quella del solista nel caso delle orchestre al completo), infine renderla compatibile con ogni tipo di utilizzo previsto.

Un articolo recuperato dai giornali dell'epoca ci ricorda le tante questioni e preoccupazioni sollevate da questa impresa: «[...] Un progetto molto audace in cui persino gli specialisti più rinomati del mondo non sanno dove mettere le mani. Tralasciando la famosa "cacofonia" dei progettisti dell'Opera House di Sydney, i newyorkesi hanno dovuto di recente smontare e rimontare una sala, nonostante sia all'opera un autorevole esperto di acustica. A queste condizioni si aggiunge la pretenziosa ambizione di compiacere ogni singolo appassionato di musica – dalla classica al jazz, dal rock alla musica leggera e alle fanfare – senza per questo dimenticare il comfort necessario a ospitare conferenze, congressi o fiere: cercare la quadratura del cerchio sarebbe più semplice. [...] Un famoso esperto di acustica americano, John Meyer si è recato sul posto e ha fatto una diagnosi chiara e concisa: questa sala sarà un *white elephant*, cioè un fallimento. Meyer ha affermato perentoriamente che lo spazio non sarà per niente adatto né al jazz né alla musica leggera».³

Contesto difficile e delicato, dunque, quello in cui si inserisce la realizzazione della sala sinfonica. In quello stesso periodo assistiamo alle prime elaborazioni sonore al computer: fanno la loro comparsa, ad esempio, le prime cartografie di «lanci di raggi», che permettono di visualizzare tutte le possibili riflessioni tra un punto di emissione e un punto di ricezione in una stanza. Ma l'essenziale di questa scienza rimane una prerogativa degli esperti: sarebbe un errore affidarsi al mero confronto dei risultati ottenuti, lasciandosi ingannare dalla loro apparente oggettività.

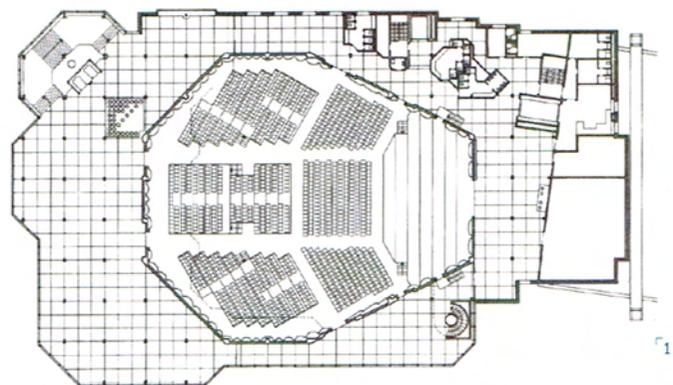
In uno scenario così incerto e appassionante, Mario Rossi ha scelto un approccio pragmatico e determinista: definire, spiegare e ricordare costantemente il quadro di riferimento stabilito, sintetizzandolo in termini e formulazioni comprensibili a tutti – esperti di acustica, architetti, costruttori, commentatori e opinionisti. Mettere poi rapidamente in moto gli strumenti di calcolo e di valutazione per misurare tutti i componenti della lavorazione, del rivestimento e della strumentazione non ancora precisati. Infine verificare il valore di tutti i parametri e la loro convergenza verso il quadro di riferimento stabilito tramite test che inizialmente saranno effettuati su piccola scala e poi sempre più su grande scala. Sorta di «giudice di pace» suo malgrado, per l'aura scientifica e tecnica che circonda il suo campo di specializzazione, la competenza acustica avrebbe dovuto produrre uno studio ineccepibile nelle analisi, nei risultati e nelle previsioni, tenere conto di tutti i vincoli tipici di un cantiere di questo genere – specialmente quelli economici e temporali – e comunicare in modo chiaro, trasparente e oggettivo con tutte le parti in causa. Così, con il sostegno di un quadro di riferimento accessibile a tutti, la progettazione dell'acustica naturale avrebbe potuto finalmente affrontare le tre principali problematiche: riverbero, riflessione e propagazione. Queste ultime due, essendo collegate tra loro, potrebbero essere più precisamente riassunte dalla combinazione di due indicatori: un tempo di riverbero di circa 1,8 secondi e l'arrivo di una riflessione in qualsiasi punto della sala a un massimo di 30-60 millisecondi dall'arrivo del suono diretto.⁴

Riguardo al fenomeno delle riflessioni, la teoria applicata al disegno dell'auditorium Stravinsky consisteva nella semplice conservazione di un principio antico: perché un

ascoltatore possa vedere e sentire bene con un'acustica naturale, la sua vista deve essere orientata direttamente verso l'oratore, il cantante o il musicista – a prescindere dal posto occupato nel teatro. Inoltre all'orecchio deve giungere il «suono diretto», cioè quello che si propaga in linea retta dalla sorgente. Ma l'orecchio non è l'occhio, e i suoni si muovono infinitamente più lenti della luce e diminuiscono molto più velocemente con la distanza percorsa. Per soddisfare a pieno l'udito sono necessarie altre due condizioni: innanzi tutto non bisogna generare echi, o più precisamente echi franchi, cioè interferenze del messaggio sonoro; in secondo luogo, è importante che la potenza delle note più sottili e deboli sia sostenuta, aumentata e rinforzata, affinché queste non si perdano o muoiano durante il viaggio che le conduce fino alle ultime file. In sintesi, la padronanza del fenomeno della riflessione, che si potrebbe definire anche «buona» o «speculare» o più semplicemente «utile», come si dice in gergo acustico, consiste nel rafforzare il suono diretto senza generare echi. A questo proposito è d'obbligo ricordare una semplice regola, che deriva dalla particolare caratteristica dell'udito per la quale non è possibile distinguere due suoni troppo vicini: per essere utile e vantaggiosa, la riflessione deve tassativamente raggiungere il nostro orecchio molto rapidamente dopo il suono diretto. Così, in un ambiente particolarmente ampio e dal soffitto alto, la sfida consiste nel riuscire a «riempire il vuoto» del suono introducendo una riflessione precoce intermedia che si inserisca precisamente in questo intervallo di tempo. Questa operazione risulta particolarmente importante per i posti situati al centro della sala, i quali, a causa della distanza dalle pareti laterali e dal soffitto, ricevono riflessioni tardive e un suono diretto troppo breve.

Poiché la scienza moderna ha dimostrato che il ritardo tra suono diretto e prima riflessione dovrebbe essere dell'ordine di 30-60 millisecondi (30 nel caso dell'orecchio di un musicista o di un appassionato di musica, e fino a 60 nel caso più generale), il problema è stato quello di trovare un modo per garantire tali riflessioni in tutta la sala quale che fosse la configurazione del palcoscenico.

Per creare riflessioni precoci vengono usati ultrasuoni, onde e abat-son acustici. Poiché i suoni si riflettono sulle pareti come un pallone che rimbalza, con lo stesso angolo di incidenza, è subito parso evidente – sin dalla prima lettura della pianta planimetrica con la sua forma ottagonale, il palcoscenico avanzato e le due grandi pareti laterali – che tutta la fila centrale avrebbe ricevuto onde sonore dirette molto corte ed echi laterali molto tardivi. Lo stesso vale per il taglio verticale. Pertanto, l'unico modo per mantenere inalterata la planimetria generale della sala è stato di introdurre ulteriori riflettori sonori o elementi che modificassero gli angoli di riflessione. Con uno svantaggio importante: sapendo che i suoni, soprattutto quelli bassi, richiedono superfici relativamente grandi per riflettere bene, in che modo è possibile introdurre questi



dispositivi senza compromettere gli sforzi architettonici compiuti in nome dell'estetica, i requisiti di illuminazione e condizionamento dell'aria, e infine le necessità relative alla fotografia scenica e all'ergonomia? La soluzione che concilierà architettura e acustica si concretizzerà nelle famose pareti a onde «rovesciate», otto abat-son ricurvi, elegantemente sospesi sopra la sala e un altro molto esteso per il palco.

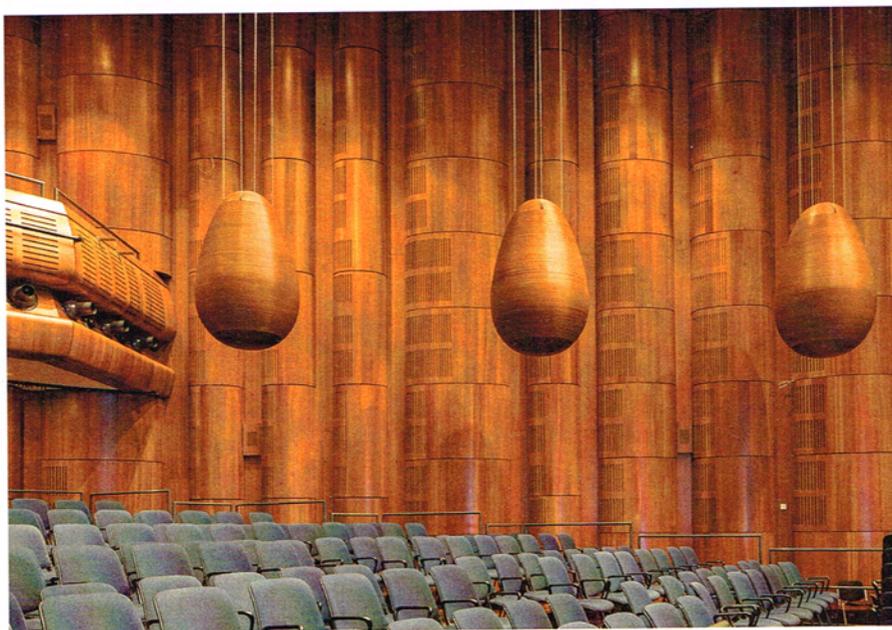
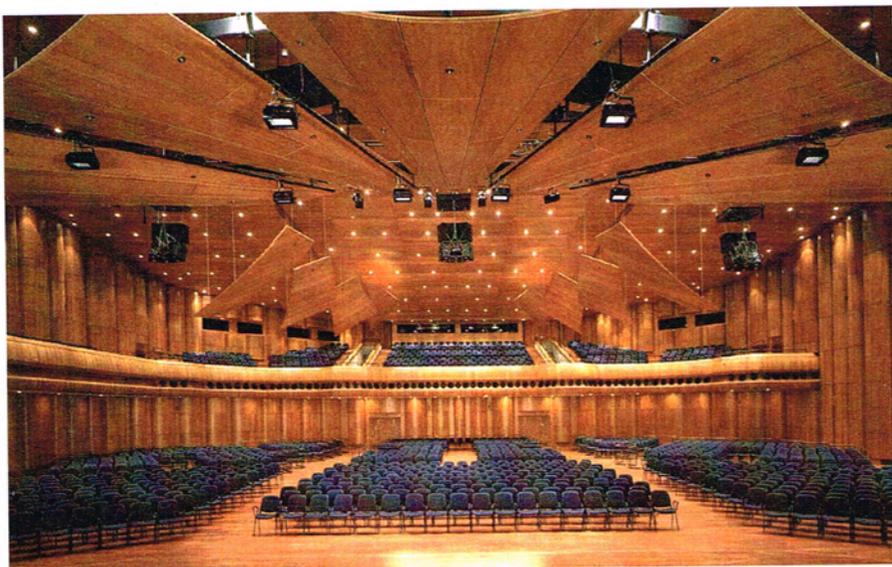
La sala doveva essere interamente rivestita di pannelli di legno ricurvi e rivestiti in ciliegio. Lo studio di questo rivestimento poteva essere effettuato sia per mezzo di simulazioni al computer che sperimentalmente. Dato che le prime simulazioni dette «lanci di raggi» dovevano essere testate e sviluppate dal laboratorio, si è deciso di effettuare il seguente lavoro sperimentale: inizialmente abbiamo realizzato, con materiali rigidi – quindi riflettenti – un modello fisico dell'intera sala, in scala 1:20, ricostruendo la grande opera architettonica per intero, con il soffitto mobile e il pavimento completamente assorbente; dopo di che abbiamo dotato questa riproduzione di una strumentazione sperimentale che ci ha permesso di misurare tutte le riflessioni dell'ambiente, e quindi di studiare diversi tipi di dispositivi per la regolazione di quest'ultime.

Per rispettare le leggi acustiche nel modello fisico – specialmente i divari temporali tra le riflessioni – era ne-

cessario trovare un espediente tecnico: dato che la riproduzione era in scala 1:20, abbiamo rielaborato tutto lo studio con lunghezze d'onda 20 volte più corte, vale a dire con ultrasuoni. A tal fine abbiamo utilizzato un dispositivo chiamato TDS (Time Delay Spectrogram), molto all'avanguardia per l'epoca, che però non consentiva di lavorare con gli ultrasuoni, così siamo stati costretti ad eludere il problema ricorrendo a un'invenzione di Jacques Hufschmidt creata apposta per l'occasione. Questo strumento aveva la funzione di intercettare le emissioni prodotte, trasformarle in ultrasuoni e trasferirle nel modellino; infine riconvertirle nelle loro condizioni di partenza dopo avere effettuato gli esami necessari. È interessante notare come l'intero studio acustico sulla riflessione e la diffusione del suono sia stato realizzato attraverso l'analisi di suoni non udibili. Lo studio, che nel giro di poche settimane ha generato migliaia di ecogrammi nel tentativo di trovare la forma giusta dei riflettori sonori – testando moltissime forme diverse realizzate in lamiera ricurva – ha dato luogo essenzialmente a tre risultati:

- la correzione della lateralità delle riflessioni e della diffusione sonora: i pannelli ondulati applicati sulle pareti laterali principali sono stati invertiti per allargare il campo alle riflessioni indirizzate sullo stesso lato;
- la correzione della verticalità: due file di quattro rifletto-

- 1 Architectes Jean-Marc Jenny, Pierre Steiner Architecture S.A., Auditorium Stravinski, Montreaux 1990-1992. Pianta dello spazio espositivo e della sala da concerto
- 2-3 L'Auditorium Stravinski come si presenta oggi, dopo l'intervento - ad opera degli acustici d'Silence e dello scenografo Jean-Paul Chabert, che nel 2010-11 ha introdotto alcune migliorie al funzionamento acustico d'origine, pur conservando la calda atmosfera interna data dal legno di ciliegio. In alto: la sala vista dal palcoscenico; in basso: le «uova» appese lungo la parete adiacente al giardino, per compensare una dissimmetria della galleria. Foto 2, Claude Bornand; foto 3, Michel Figuet
- 4-5 Ecogramma e sfera di localizzazione dei risultati della misurazione. Fonte Eric van Lancker, *Acoustic goniometry: a spatio-temporal approach*, Lausanne 2001-2002. Tesi di dottorato EPFL, p. 84
- 6 Array cubico di microfoni omnidirezionali. Mario Rossi, *Audio*, Presses polytechniques et universitaires romandes, Lausanne 2007

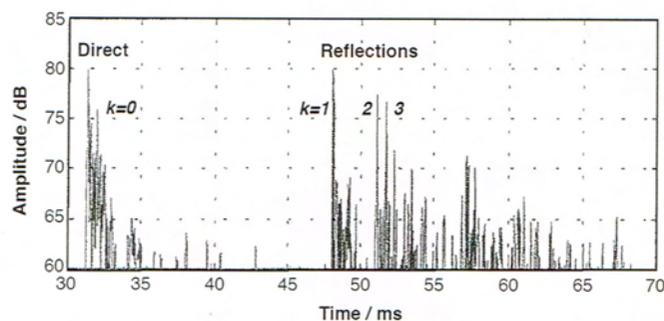
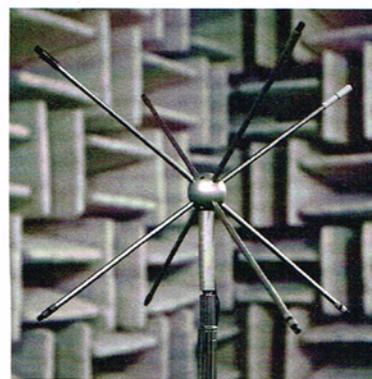
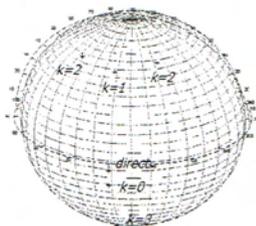


ri trapezoidali ricurvi sospesi sono stati inseriti per proiettare un suono precoce sull'intero asse centrale della platea e sulle gradinate;

- infine la correzione del palcoscenico: è stato installato un ampio *abat-son* a ventaglio inclinato in modo tale che i musicisti - o chiunque si trovi sulla scena - in qualsiasi punto del palco riceva un feedback acustico completo in un tempo molto breve e che l'intera area più critica della prima fila sia implementata da riflessioni utili precoci.

Il secondo aspetto del problema consisteva nella gestione del fenomeno del riverbero. Il sacrosanto ideale di 10 mc per ascoltatore, volume indispensabile perché, come nelle cattedrali, l'ambiente «mantenga» sufficientemente - ma non eccessivamente - il suono, è stato subito preso in considerazione e concretizzato dagli architetti sin dalla prima fase di progettazione. A quel punto bisognava occuparsi del livello di assorbimento acustico di tutto il rivestimento interno, in particolare delle poltrone. Inoltre l'acustica naturale sarebbe dovuta rimanere inalterata nonostante la variabilità del tasso di occupazione della sala, al fine di poter ospitare anche piccoli complessi come quelli di musica da camera. Per quanto riguarda il rivestimento delle pareti e del soffitto, costituito da pannelli medio pesanti rivestiti in ciliegio, la difficoltà risiedeva essenzialmente nell'ottenere allo stesso tempo un alto livello di assorbimento per i suoni medi e bassi e un livello minore per quelli acuti. Con il tipo di rivestimento imposto il nostro margine di manovra era molto ridotto. Potevamo decidere circa lo spessore dei pannelli, se e quanto irrobustirli, come adattarli ai materiali assorbenti per sopperire alla conformazione dei lati posteriori di queste lastre che, per forma e strutture di fissaggio, costituivano volumi cavi, ovvero cavità acustiche il cui assorbimento interno condizionava il riverbero complessivo dell'ambiente, almeno a determinate altezze sonore. Per quanto riguarda le poltrone, avremmo dovuto adeguarci a un'ovvia esigenza: perché l'acustica dell'ambiente potesse dipendere il meno possibile dal tasso di riempimento, una poltrona vuota avrebbe dovuto avere la stessa capacità di assorbimento acustico di una occupata. Tutte queste ottimizzazioni sono state effettuate in modo standardizzato: il metodo utilizzato, noto agli acustici e agli architetti, consisteva nell'assegnare a ogni elemento del rivestimento un coefficiente di assorbimento e poi convalidarli su piccola scala attraverso campioni di circa 10-12 mq in una stanza riverberante di laboratorio. Per curiosità, la «fase poltrone» di questi test ha richiesto al personale di laboratorio di rimanere seduti stoicamente per trenta minuti su venti delle 1800 poltrone fornite dalla ditta vincitrice della gara d'appalto, ascoltando in silenzio un centinaio di raffiche da venti secondi di rumore bianco intenso. Alla fine, dopo numerose prove, non avendo trovato un prototipo di poltrona che corrispondesse al requisito dell'invariabilità del grado di assorbimento acustico, ci siamo rivolti a un costruttore con il quale abbiamo trovato una soluzione: abbiamo distribuito una ventina di fori su tutta la parte inferiore dei sedili, creando quelli che nel linguaggio acustico vengono definiti risonatori di Helmholtz, regolati (diametro, forma del collo, profondità) per aumentare l'assorbimento acustico.

Circa dieci anni dopo, quando la sala era ormai stata utilizzata in molte occasioni, confermando le sue qualità, il laboratorio aveva fatto progressi anche in molti altri campi, alcuni dei quali direttamente applicabili all'acustica ambientale. Ne è testimone una conferenza del 108° convegno della Audio Engineering Society tenutasi nel febbraio 2000 e intitolata *Localization of Reflections in Auditoriums using Time Delay Estimation*. In quell'occasione, grazie a una nuo-



4+6
5+

va tecnica sperimentale di misurazione, è stato confermato che le riflessioni nella sala corrispondevano precisamente a quelle previste e regolate dal metodo degli ultrasuoni applicato al modello fisico. La nuova tecnica, conosciuta come beamforming o goniometria acustica, ha introdotto l'utilizzo di un'antenna dotata di microfoni collegata a un algoritmo di calcolo, che ha permesso di determinare con grande precisione la direzione di incidenza delle onde sonore ricevute in qualsiasi punto dell'ambiente.

Per la cronaca, Mario Rossi in persona aveva ingaggiato nel suo laboratorio l'autore di questi studi, Eric Van Lancker, ingegnere belga da poco laureato in teoria dei segnali e gli aveva fornito gli strumenti per sviluppare questa ricerca, che poi ha dato luogo a una tesi di dottorato dal titolo *Acoustic Goniometry: a spatio-temporal approach* e alla creazione di una delle prime start-up del Parco scientifico dell'EPFL: la società di ingegneria acustica e vibrazionale IAV Engineering, ancora oggi molto attiva in diversi settori altamente specializzati dell'acustica applicata e precisamente in quello delle antenne acustiche.

Scienza tra le più antiche, l'acustica ambientale - o per lo meno i suoi fondamenti - non si evolve praticamente più nella dimensione dell'acustica naturale, ma gli strumenti a disposizione dei progettisti si sviluppano ovviamente sulla scia del progresso tecnologico-informatico. Oggi esistono diverse soluzioni per la modellizzazione e la simulazione acustica che permettono di determinare con precisione, sin dalla prima fase di progettazione, le caratteristiche acustiche ed elettroacustiche ambientali, arrivando addirittura a ricreare le condizioni di ascolto effettive in qualsiasi tipo di contesto. Questi dispositivi di calcolo e di virtualizzazione, sommati agli strumenti di elaborazione digitale dei segnali in tempo reale, o ancora, ai nuovi materiali o rivestimenti detti intelligenti - che, introdotti dal professor Lissek, rappresentano un caposaldo per il laboratorio LEMA-EPFL -, fanno sì che i limiti di questa scienza presto saranno solo un ricordo sbiadito. D'altro canto, poiché ormai i segreti di questa disciplina sono per così dire «contenuti negli strumenti stessi», bisogna riconoscere che il periodo dei grandi esperti di acustica ap-

partiene probabilmente al passato e che il futuro si prospetta necessariamente meno appassionante e originale, ma certamente più tecnologico e digitalizzato.

Queste innovazioni hanno permesso di migliorare e perfezionare ulteriormente l'auditorium Stravinsky⁵ e di affermare – com'era prevedibile e nonostante il desiderio di credere il contrario – che uno Stradivari non possiede qualità acustiche oggettivamente superiori a quelle di un ottimo violino moderno, contrariamente alla leggenda popolare e senza per questo sminuire la genialità del suo creatore. I risultati prodotti dalla nuova strumentazione tecnologica di cui dispone l'acustica applicata, meriterebbero, proprio come in enologia o in farmaceutica, di essere sottoposti a uno studio in doppio cieco, per riuscire a creare un dibattito effettivo tra tecnici e specialisti. Il solo giudizio valido proviene dal puro ascolto: il suono non conosce esperti acustici, i suoi unici punti di riferimento sono i musicisti e il pubblico.

Traduzione di Scriptum



Testo originale in francese
www.espazium.ch/archi2-18_chritin

Das Universum der Raumakustik

Ein ehemaliger Assistent/Doktorand des verstorbenen Professors Mario Rossi am LEMA-EPFL, der 1990 an der Feinabstimmung und Fertigstellung der natürlichen Akustik des Auditorium Strawinsky in Montreux mitgearbeitet hatte, berichtet über das Projekt. Zur Sprache kommen die Analyse und Korrektur des internen Widerhalls bzw. der Verkleidung der Seitenwände, der Decke und der Bühne, bis hin zur in-situ-Validierung der kritischsten Teile. Thematisiert werden auch die Optimierung und Einstellung des Nachhalls des Saals mit Hinblick auf alle vorgesehenen Nutzungen, wobei die symphonische Musik prioritär behandelt wurde. Nach ausführlich diskutierten, anfänglichen Zweifeln fand man Elemente, die schliesslich eine als exzellent anerkannte natürliche Akustik ermöglichen. Diese basiert auf der Architektur eines Saales, der schwierige Voraussetzungen bot: sehr hoch und breit, vielseitig bespielt und von daher per Definition auf einschneidende akustische Kompromisse ausgelegt. Insbesondere die gesamte zentrale Zone und die Bühne wiesen widrige Bedingungen auf. Nichtsdestoweniger konnte das Team von Prof. Rossi auch in diesem schwierigen Kontext die akustischen Untersuchungen stichhaltig und termingerecht durchführen. Zum Einsatz kamen zahlreiche Labortests zum Verhalten der Schallabsorption und ein physisches Modell des Saals, in dem die gesamte akustische Geometrie mit einer experimentellen Technik, der Ultraschallmessung, bearbeitet wurde.

Traduzione di Scriptum

Note

1. Il lemma deriva dal capovolgimento delle prime quattro lettere della parola «spectrum». È stato definito nel 1963: il cepstrum di un segnale è la trasformata di Fourier del logaritmo della trasformata di Fourier del segnale.
A volte viene chiamato lo spettro dello spettro.
2. Estratto dall'opuscolo *Réalisations Immobilières* (febbraio 1993, p. 27). La riflessione affidata ai progettisti racchiude diversi elementi. A livello architettonico, l'adeguamento degli straordinari, imponenti volumi previsti all'ambiente prestigioso in cui di fatto si inseriscono; la giustapposizione con l'edificio esistente; la realizzazione di collegamenti e percorsi esterni ed interni. Dal punto di vista tecnico, le elevate aspettative da soddisfare in termini di acustica, dispositivi scenici, temperatura interna e illuminazione naturale e artificiale. Concettualmente, l'adattamento delle dimensioni straordinarie alla vasta gamma di servizi previsti; per questo motivo è diventato importante che il progetto venga sviluppato anche per offrire la migliore versatilità d'uso possibile. A ogni modo lo spazio è stato progettato come sala da concerto con acustica naturale.
3. Pierre-Alain Luginbühl, *Polyvalence, vous avez dit polyvalence? Pour le classique, ce devrait être 18 carats. Pour le jazz et le rock, ce sera plus craca*, «L'Est Vaudois», 24 gennaio 1991, p. 5.
4. Un quadro di riferimento riassunto in soli due numeri: 1,2 secondi e 30 millisecondi: «L'acustica naturale di un ambiente dipende principalmente

dal volume e dalla forma. Il volume determina il riverbero, fenomeno di prolungamento del suono percepibile da tutti. Considerando che il riverbero ottimale di una sala sinfonica è di circa 1,8-2 secondi, ciò richiede un volume di 10 mc per ascoltatore, cioè 18.000 mc per 1800 ascoltatori. La forma condiziona due fenomeni essenziali: le prime riflessioni e la propagazione del suono. Le proporzioni della sala risultano sia da queste considerazioni, sia dalle scelte strutturali (numero e distribuzione degli ascoltatori, ubicazione e dimensioni del palco, disposizione e inclinazione delle tribune ecc.). Le prime riflessioni determinano la qualità dell'acustica: un ascoltatore deve ricevere non solo un suono diretto da ogni musicista o cantante, ma anche riflessioni buone e forti che giungano all'orecchio con brevissimi ritardi (massimo 30 millisecondi). Se questi ritardi fossero maggiori, la qualità del suono si abbasserebbe, rischiando di generare echi».

5. L'estratto che segue, tratto dal comunicato *Echo Silence*, riporta un resoconto dei lavori di ristrutturazione effettuati vent'anni dopo la realizzazione della sala. In sezione, la geometria del soffitto è stata modificata per realizzare i passaggi per i tecnici e ridurre leggermente i tempi di riverbero della sala. I «gusci» acustici sono stati rimontati su telai metallici, funzionali ad aprire meccanicamente i pannelli del soffitto (del peso da una a tre tonnellate) con precisione millimetrica, per mezzo di motori molto potenti. Il soffitto tecnico,

uno spazio situato nella parte superiore della sala, è stato trattato con più di 700 deflettori acustici per sostenere il passaggio delle onde sonore al momento dell'apertura dei gusci. Esperti artigiani – che hanno lavorato issati su travi a tredici metri da terra come i costruttori dei grattacieli di un tempo – hanno smontato, modificato e rimontato legno e metallo con tocco d'artista. La propagazione del suono dal palcoscenico al fondo della sala è stata elegantemente fluidificata col supporto di risuonatori costruiti sul retro dei gusci delle pareti. Questi risuonatori, di dimensioni variabili, calibrati sulle frequenze da neutralizzare, hanno dato parecchio da fare ai falegnami! Per poter realizzare manualmente più di 4 km di scanalature su gusci con curvature variabili, è stato necessario costruire dei prototipi al fine di verificare la metodologia di lavoro, la fabbricazione dei modelli e implementare tutte le procedure che permettevano di non danneggiare il rivestimento dei gusci. Anche il fondo della sala e il parapetto della galleria sono stati trasformati per aumentarne la trasparenza acustica, tramite scanalature o con l'applicazione di pannelli acustici in legno forato. (Fonte: d'Silence acoustique SA, giugno 2011)

Résumé : Auditorium Stravinsky de Montreux. Témoignage d'un ancien assistant-doctorant de feu Prof. Mario Rossi, au LEMA-EPFL, qui avait participé en 1990 à la mise au point et la finalisation de l'acoustique naturelle de la salle. Analyse et correction de la réflexion interne, c'est-à-dire l'habillage des parois latérales, du plafond et de la scène, jusqu'à la validation in-situ pour les parties les plus critiques. Optimisation et réglage de la réverbération de la salle pour satisfaire au mieux toutes les utilisations prévues, avec une priorité pour le symphonique. Points qui avaient finalement, après des interrogations et des inquiétudes initiales beaucoup débattues, permis l'obtention d'une acoustique naturelle reconnue comme excellente pour un choix architectural de base pourtant ambitieux et contesté d'une salle esthétiquement très large, haute et d'utilisation polyvalente, nécessitant par définition des compromis acoustiques importants et en particulier, défavorable pour toute la zone principale centrale, et la scène. Dans ce contexte sensible les études acoustiques avaient néanmoins pu être menées valablement et jusqu'à leur terme par l'équipe du Prof. Rossi, en particulier au moyen de nombreux essais en laboratoire de performance d'absorption phonique, et d'une maquette physique de la salle, dans laquelle avaient pu être travaillées toute l'acoustique géométrique au moyen d'une technique expérimentale de mesure par ultrasons.

Cette salle, c'est un peu, sans oublier par ailleurs le concours de M. Bruno Gandet, le chef-d'œuvre du regretté professeur Mario Rossi, le *Super-Mario* de l'acoustique à l'EPFL durant deux décennies, ainsi que nous l'appelions dans son laboratoire, alors qu'il feignait de ne pas le savoir. Mario Rossi, dont le saxophone s'est définitivement tu il y a seulement quelques mois. Lui qui a tant aimé et su partager avec nous, ses étudiants et assistants, cette science si particulière de l'acoustique appliquée. De surcroît lorsqu'elle s'appliquait à vouloir restituer le plus fidèlement possible, dans tout un espace, les sons, la musique et la parole. Réverbération, réflexions, échos, parois, clarté, intelligibilité, sonorisation, tout un vocabulaire inlassablement décliné, appliqué et comparé entre théorie et pratique. Tout un monde de mesures, tests, expériences, calculs, simulations et modélisations. Le monde de cette acoustique-là, celle que l'on appelle « l'acoustique des salles ».

Souvent l'on trouve acoustique écrit avec deux « c » – accoustique – comme pour souligner que quelque-chose dans cette science ne va pas toujours de soi, accroche. En anglais – acoustics – il faut toujours faire un petit effort pour se rappeler ce fameux « s » de fin qui distingue le nom – ou l'adjectif – de la science elle-même. Un peu comme « algorithme » qui survient lui aussi souvent à l'écriture avec un « y », comme pour lui donner un peu de rythme. Puis l'œil perçoit que quelque-chose cloche. Que dire enfin du logarithme, cette base arrière du fameux décibel qui est à l'acousticien prétentieux ce qui définitivement le distingue du commun, ce pauvre ignorant qui ne comprendra jamais pourquoi en acoustique « fois deux » fait trois, parfois même six, en fonction de la manière dont les « deux » sont en phase, justement.

Décibels, niveaux, intensité, puissance, fréquences, amplitude, phase, spectres et même « cepstres ». Diable, voilà donc tous ces mystères qui placent définitivement l'acousticien, un peu comme le physicien, dans un autre monde que celui de l'auditeur moyen.

A l'époque, il y a presque 30 ans, celle du premier Macintosh à disquette et de Windows 3.1 notamment, où les simulations acoustiques n'étaient encore accessibles que de manière

embryonnaire dans les logiciels de conception, il était réputé que pour espérer « réussir l'acoustique » d'une salle, ou, plus encore, d'une salle symphonique appelée à devenir une référence au moins régionale, la personne de l'acousticien, dans toute l'incarnation de son inaccessible savoir sur la maîtrise des sons, était incontournable. Au même titre finalement, et pour des raisons assez similaire, qu'un autre personnage lui aussi auréolé du prestige de toute sa

corporation : l'Architecte. Personnage par définition central de tout projet architectural, puisque sans qui une étude acoustique ne pourrait même pas débiter faute de disposer d'une situation à considérer.

1990 au laboratoire LEMA-EPFL, le Prof. Mario Rossi nous expose, à mon collègue de l'époque Walter Koeller et moi-même, ses assistants, le travail qu'il attend de nous pour l'aider dans la conception d'un nouvel auditorium, à Montreux. De mémoire, Mario Rossi nous résume la problématique et nos objectifs en les termes les plus simples suivants : *« Nous avons un projet passionnant, il s'appelle MC3, nom provisoire de la future salle symphonique de Montreux. Nous prenons le train en route : c'est M. Gandet, acousticien chez Baechli à Baden qui en a réalisé une très bonne pré-étude. La première difficulté que nous allons devoir prendre en compte est la forme très large et haute de la salle, forme éloignée de la figure acoustique idéale en « boîte à chaussure ». Cette forme répond au besoin de « 10 m³ par auditeurs » imposé par la pré-étude pour la réverbération naturelle, et satisfait par ailleurs toutes les autres contraintes architecturales non-acoustiques, notamment la visibilité dans la salle et son parti-pris esthétique. La deuxième difficulté est que l'acoustique de la salle devra être bonne quel que soit le taux d'occupation de la salle, donc de presque vide à pleine de public. La troisième est que la salle devra être polyvalente. Donc l'acoustique devra être utilisable aussi bien pour le classique, le jazz, le rock, la musique de chambre ou les fanfares que pour la parole, les conférences, expositions, congrès ou manifestations de sociétés, sans oublier les comédies et ballets. Ces contraintes sont incontournables et l'acoustique doit être excellente, « 18 carats » et en naturel pour le symphonique, et complétée d'une installation électro-acoustique de sonorisation pour les autres cas. Nos données de base intangibles sont donc, en résumé : un volume de 18'000 m³, une capacité de 1800 places assises et des dimensions intérieures déjà toutes fixées ».*

Extrait de la brochure REALISATIONS IMMOBILIERES (Fiche 27 / Février 1993) : Différents aspects entourent la réflexion confiée aux concepteurs. Ils ont trait, plus particulièrement :

- sur le plan architectural, à l'adéquation des nouveaux et imposants volumes avec l'environnement prestigieux immédiat et éloigné dans lequel ils prennent place; à la juxta position avec l'édifice existant; à la réalisation des liaisons et cheminements extérieurs et intérieurs.
- sur le plan technique, à la satisfaction d'exigences élevées en matière d'acoustique, de techniques scéniques, de climat intérieur et d'éclairages naturels ou artificiels.
- sur le plan conceptuel: les nouveaux volumes sont appelés à des services aussi nombreux que divers; pour cette raison il est apparu d'importance que le projet soit également développé en vue d'offrir la meilleure polyvalence d'usage possible. La salle cependant a été conçue comme salle de concert à acoustique naturelle.

La problématique était donc d'obtenir une acoustique naturelle optimale avec une grande ampleur latérale et de hauteur de plafond, pour un degré de remplissage variable de la salle et différentes occupations de la scène (soliste de position changeante à orchestre complet), et d'assurer la meilleure compatibilité possible avec toutes les autres utilisations prévues.

Retrouvé dans la presse de l'époque, un article nous rappelle les nombreuses inquiétudes et interrogations suscitées à l'origine par ce projet : *« [...] un exercice de haute voltige sur lequel les spécialistes les plus renommés de la planète se cassent encore les dents. Sans remonter jusqu'à la cacophonie célèbre des concepteurs de l'Opéra de Sydney, les New Yorkais viennent tout juste de démonter puis de remonter entièrement une salle, confiée pourtant à un acousticien faisant autorité. Quand vous voulez de surcroît, sublime exigence, qu'une même salle satisfasse*

indistinctement des amateurs de classique, de jazz, de rock, de variétés, de fanfares, sans oublier le confort des auditeurs d'une conférence, des congressistes ou des visiteurs de stands de foire, c'est carrément la quadrature du cercle... [...] Un acousticien américain de grande renommée, John Meyer, est venu sur place et a établi un diagnostic sec et sonnant : cette salle sera un « white elephant », c'est-à-dire une salle ratée. [...] Il affirme péremptoirement qu'elle ne conviendra pas du tout au jazz et aux variétés. » (24/01/1991, Pierre-Alain Luginbuhl). Contexte sensible et stressant donc que celui dans lequel s'inscrivait le travail d'acoustique proprement dit, à cette époque charnière où les premières représentations informatiques des sons commençaient à pouvoir se matérialiser, par exemple sous formes de cartographies de « tirs de rayons » qui permettaient les premières visualisations de toutes les réflexions possibles entre un point d'émission et un point de réception dans une salle, mais pas l'essentiel, qui restait encore comme une sorte de science de celui qui sait, plutôt que de la comparaison de résultats plus tangibles et au moins en apparence objectifs parce que mieux représentables.

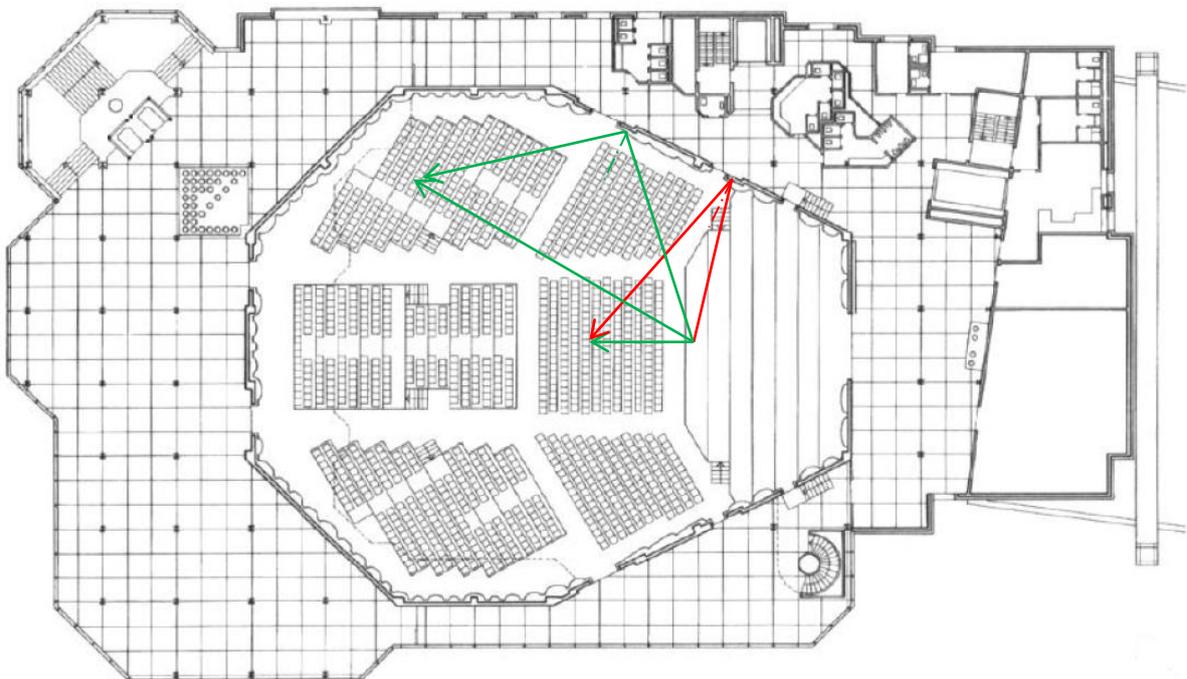
L'approche adoptée par Mario Rossi dans ce contexte sensible et passionné a été déterministe et pragmatique : Définir, expliquer puis rappeler sans cesse le référentiel visé en quelques valeurs et formulations compréhensibles de tous, acousticiens, architectes, maître d'œuvre, observateurs et commentateurs. Mettre rapidement en œuvre ensuite les moyens de calcul et de mesure permettant de dimensionner toutes les composantes de traitement, d'habillage ou d'équipement encore libres de marge de manœuvre. Vérifier enfin, par des essais d'abord à petite échelle puis de plus en plus à grande échelle, la valeur de tous les paramètres et leur convergence vers le référentiel fixé. Sorte de « Juge de Paix » un peu malgré elle, de par son aura scientifique et technique sur son sujet de pleine spécialité, la compétence acoustique du projet devait donc faire en sorte de tenir un cap irréprochable dans ses analyses, ses résultats et ses préconisations, de s'adapter à tous les impératifs notamment économiques et temporels d'un chantier de ce type, et d'assurer clarté, complétude, transparence et objectivité dans sa pédagogie avec tous les autres intervenants.

Un référentiel acoustique exprimé en seulement deux nombres : environ 2 secondes et 30 millisecondes : « L'acoustique naturelle d'une salle dépend en premier lieu de son volume et de sa forme. Le volume conditionne la réverbération, phénomène de prolongation du son perceptible par chacun. Etant admis que la réverbération optimale d'une salle symphonique est d'environ 1.8 à 2 secondes, ceci requiert un volume d'environ 10 m³ par auditeur, soit 18'000 m³ pour 1'800 auditeurs). La forme conditionne deux phénomènes essentiels: les premières réflexions et la diffusion du son dans la salle. La forme, donc les proportions de la salle, résulte de ces considérations et du choix de son plan (nombre et répartition des auditeurs, situation et dimensions de la scène, disposition et inclinaison des gradins, etc.). Les premières réflexions déterminent la qualité d'écoute : un auditeur doit recevoir non seulement un son direct de chaque musicien ou chanteur, mais encore de bonnes et fortes réflexions survenant avec de tout petits retards (au plus 30 millisecondes). Si ces retards étaient plus grands, on aurait une dégradation de la qualité d'écoute, voire des échos ».

Ainsi, avec la simplicité du référentiel adopté, la conception de l'acoustique naturelle devait finalement répondre à trois critères : la réverbération, les réflexions et la diffusion. Les deux derniers, réflexions et diffusion, étant liés, elle pouvait se résumer encore plus concrètement à la seule tenue de deux indicateurs : une durée de réverbération d'environ 1,8 secondes et l'arrivée d'une réflexion n'importe où dans la salle au maximum 30 à 60 millisecondes après l'arrivée du son direct.

La réflexion de fond sur les réflexions appliquée à la conception de l'Auditorium Stravinsky a été tout simplement la conservation d'un principe venu de l'antiquité :

pour qu'un auditeur, où qu'il soit dans un théâtre, voie et entende naturellement bien, il faut d'abord bien évidemment que sa vue porte directement sur l'orateur, le chanteur ou le musicien, et, concernant les sons, qu'il entende également le « son direct », c'est-à-dire celui qui se propage vers lui en ligne droite depuis sa source. Mais l'oreille n'est pas l'œil, et les sons se déplacent infiniment plus lentement que la lumière et s'atténuent également infiniment plus vite avec la distance parcourue. Deux autres conditions doivent donc impérativement satisfaire à l'ouïe : que l'auditeur ne reçoive surtout pas d'écho, ou plus précisément d'écho franc, c'est-à-dire un brouillage du message sonore ; et, pour que les notes les plus subtiles ou les moins fortes ne se perdent pas ou meurent durant leur trajet, que leur force soit maintenue, augmentée et renforcée vers les places les plus éloignées de la scène. La maîtrise de la réflexion, ou la « bonne réflexion » pourrions-nous dire, la « réflexion spéculaire » ou plus simplement la « réflexion utile » dans le jargon de l'acousticien, est donc ainsi celle qui vient renforcer le son direct sans créer d'écho. Pour ça, une règle simplissime est la suivante, et elle tient à la particularité de l'audition qui ne nous permet pas de distinguer deux sons trop proches : pour être utile et bénéfique, la réflexion doit impérativement arriver à notre oreille rapidement après le son direct. Donc dans une salle particulièrement large et haute de plafond, tout l'enjeu de la maîtrise des réflexions est celui d'être capable, en particulier pour les sièges situés au centre de la salle, qui reçoivent un son direct court mais également des réflexions tardives du fait de leur éloignement des parois latérales et du plafond, de venir « combler le trou » de son par l'introduction d'une réflexion intermédiaire précoce parfaitement calée dans cet intervalle de temps.



La science moderne ayant démontré que le délai entre son direct et première réflexion devait être de l'ordre de 30 à 60 millisecondes (30 dans le cas d'une oreille de musicien ou de mélomane exercée et jusqu'à 60 dans le cas plus général), la problématique consistait alors à trouver un moyen de garantir de telles réflexions partout dans la salle et quelle que soit la configuration de la scène.

Ultrasons, vagues et abat-sons pour produire des réflexions précoces. Les sons se réfléchissant sur les murs, comme un ballon qui rebondit, avec le même angle que l'angle d'incidence, il était évident à la simple lecture du plan de la salle, avec sa forme octogonale, sa scène avancée et ses deux grands murs latéraux de scène, que toute la rangée centrale allait recevoir des directs courts et des échos latéraux tardifs. De même en ce qui concerne la coupe verticale. Dès lors, la seule solution possible pour pouvoir conserver le plan général de salle était d'introduire des réflecteurs supplémentaires ou des éléments qui modifient les angles de réflexion. Avec un inconvénient majeur : sachant que les sons, notamment les sons graves, nécessitent des surfaces relativement importantes pour bien se réfléchir, comment introduire des réflecteurs acoustiques sans mettre à mal tous les efforts architecturaux de signature esthétique visuelle, les contraintes d'éclairage et de climatisation, et enfin les besoins de prise de vue scénique et d'ergonomie ? La solution qui conciliera architecture et acoustique se matérialisera par trois corrections majeures de la conception initiale : les fameuses vagues murales « inversées », les huit abat-son incurvés élégamment suspendus au-dessus de la salle et un abat-son géant sur la scène.

Le parti-pris d'habillage intérieur à satisfaire était celui d'une salle entièrement boisée de panneaux cintrés et plaqués en cerisier. Le travail d'analyse de cet habillage allait pouvoir être réalisé soit par simulations sur ordinateur, soit expérimentalement. Tandis que les premières fonctions de simulations dites de « tirs de rayons » allaient être testées et développées par le Laboratoire, la décision fût prise de réaliser le travail expérimental original suivant : faire réaliser une maquette physique complète de la salle, à l'échelle 1/20^{ème}, reproduisant en matériaux rigides, donc réfléchissant, tout le volume de gros œuvre du bâtiment et son plafond amovible, et comportant un plancher entièrement absorbant ; puis équiper cette maquette d'une instrumentation expérimentale permettant de mesurer toutes les réflexions dans la salle, et ainsi d'étudier différentes sortes de réflecteurs.



Pour pouvoir respecter, à une échelle 20 fois plus petite, les règles de réflexion de l'acoustique (notamment l'échelle des écarts temporels), l'originalité ou plutôt l'astuce technique a consisté à transposer toute l'étude dans des sons de longueurs d'onde 20 fois plus courtes, c'est-à-dire dans les ultrasons. Nous avons pour cela utilisé un équipement de laboratoire de pointe de l'époque, un instrument dit « de TDS » (Time Delay Spectrogramm), mais qui ne permettait pas de travailler en

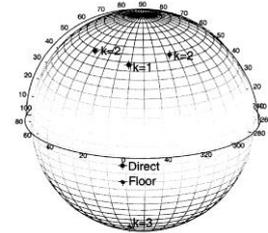
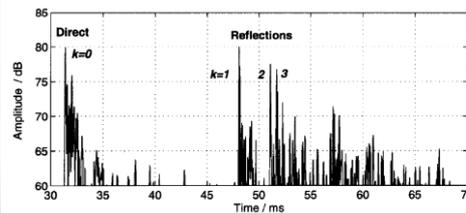
ultrasons. L'instrument avait été « leurré » par une électronique auxiliaire maison – réalisée par M. Jacques Hufschmidt – qui interceptait les émissions produites, se chargeait de les transformer en ultrasons avant de les envoyer dans la maquette, puis inversement retransformait en sons les signaux ultrasons mesurés dans la maquette. On peut ainsi relever que toute l'étude acoustique des réflexions et de la diffusion de l'Auditorium Stravinsky a été finalement réalisée avec des sons inaudibles. Les trois principaux résultats de cette étude, qui a généré en quelques semaines des milliers d'échogrammes en testant toutes sortes de formes de réflecteurs, de formes de plus en plus affinées, réalisées en tôle cintrée, ont été les suivants : d'abord correction de latéralité des réflexions et de la diffusion : les profils de toutes les vagues des deux murs latéraux principaux ont été inversés afin d'ouvrir les réflexions en fuite du même côté; puis correction de verticalité : deux rangées de quatre réflecteurs trapézoïdaux cintrés suspendus ont été introduits pour arroser en sons précoces tout l'axe central et des gradins ; enfin correction de scène : un abat-son massif en éventail incliné a été installé de manière à ce que tout musicien où qu'il soit sur la scène reçoive un retour acoustique complet très court, et que toute la zone la plus critique des premiers rangs soient arrosée en réflexions précoces utiles.



La maîtrise de la réverbération, le second versant du problème. Le sacro-saint critère d'un idéal de 10 m^3 par auditeur, volume d'air indispensable pour que la sonorité de la salle, comme dans les cathédrales, « entretienne » suffisamment (mais surtout pas trop) le son, a été directement pris en compte et satisfait dès l'avant-projet par les architectes. Restait néanmoins à régler finement l'absorption phonique de tous les habillages internes, et notamment celle des fauteuils qui constituaient la principale surface par définition molle, comparée aux habillages des murs et du plafond. La salle devait en outre présenter une acoustique naturelle inchangée quel que soit son degré de remplissage, afin notamment de pouvoir servir valablement les petites formations comme par exemple une musique de chambre. Concernant les habillages des murs et plafond, constitués de panneaux mi-lourds plaqués d'une veine cerisier, la difficulté de la maîtrise fine de la réverbération résidait essentiellement dans celle d'une bonne absorption des sons médiums et graves, celle des sons aigües étant forcément assez faible. Avec le type d'habillage imposé, les marges de manœuvres se situaient dans le choix de la masse surfacique des panneaux – plus ou moins épais –, dans la manière ou non de les raidir, et dans la manière de traiter par des matériaux absorbants l'arrière de ces panneaux, qui constituaient en effet, par leur forme et leurs structures de

fixation, des volumes arrières creux, c'est-à-dire des cavités acoustiques dont l'absorption interne gouvernait partiellement la réverbération globale de la salle, au moins dans certaines hauteurs du son. Concernant les fauteuils, finalement, on comprend intuitivement qu'ils devaient principalement satisfaire une règle simple : pour que l'acoustique de la salle dépende le moins possible de son taux de remplissage, un fauteuil vide devait pouvoir produire la même capacité d'absorption phonique qu'un fauteuil occupé. Toutes ces optimisations ont été menées d'une manière standardisée : la méthode employée, bien connue des acousticiens et des architectes, a consisté à attribuer des valeurs d'objectifs de coefficients d'absorption à chaque type d'élément d'habillage, puis à les valider à petite échelle sur des échantillons d'environ 10 à 12 m² dans une salle réverbérante laboratoire. Pour l'anecdote, la partie « fauteuils » de ces tests a exigé du personnel du laboratoire de venir à plusieurs reprises s'asseoir stoïquement durant une trentaine de minutes sur la vingtaine de fauteuils qui répondaient à l'appel d'offre des 1800 sièges, en écoutant silencieusement une centaine de salves de 20 secondes d'un bruit blanc de forte puissance. Finalement, après de nombreux tests, aucun modèle de siège n'ayant répondu de manière satisfaisante au critère de même absorption vide ou occupé, la solution trouvée en concertation avec un fabricant a consisté à percer une vingtaine de trous sous chaque siège, c'est-à-dire, en langage acoustique, à créer des résonateurs de Helmholtz réglés (diamètre, forme du col, profondeur) pour augmenter l'absorption phonique.

Pratiquement une décennie plus tard, après plusieurs centaines d'utilisations de la salle ayant plutôt confirmé ses qualités, le laboratoire avait également bien sûr progressé dans de nombreux domaines, dont certains directement applicables à l'acoustique des salles. Une conférence de la 108^{ème} convention de l'Audio Engineering Society tenue en février 2000 en atteste : Intitulée « Localization of Reflections in Auditoriums using Time Delay Estimation », elle avait démontré, grâce à une nouvelle technique de mesure expérimentale, que les réflexions dans la salle grande nature correspondaient bien aux réflexions prévues et réglées par la méthode des ultrasons dans la maquette physique.



La nouvelle technique expérimentale¹, dite d'antennerie ou de goniométrie acoustique, introduisait une antenne équipée de nombreux microphones, associée à un algorithme de calcul, qui permettait de déterminer avec une grande précision la direction d'incidence des ondes sonores reçue en n'importe quel point de la salle.

¹ Pour la petite histoire c'est Mario Rossi qui avait engagé dans son laboratoire l'auteur de ces travaux, Eric Van Lancker, ingénieur belge fraîchement diplômé en traitement de signal, et lui avait donné les moyens de développer ces recherches, qui aboutiront à une thèse de doctorat fondatrice intitulée « Acoustic Goniometry : a spatio-temporal approach », et à la création de l'une des premières start-up du Parc Scientifique de l'EPFL, l'entreprise d'ingénierie acoustique et vibratoire IAV Engineering, aujourd'hui encore très active dans plusieurs domaines spécialisés de l'acoustique appliquée et justement celle de l'antennerie.

Science des plus anciennes, l'acoustique des salles, ou du moins ses fondamentaux, n'évolue pour ainsi dire presque plus dans sa dimension de l'acoustique naturelle, mais les outils à disposition des concepteurs ont par contre logiquement suivi l'explosion de tous les moyens de conception informatisés. Il existe ainsi aujourd'hui de multiples possibilités de modélisation et de simulation acoustique d'une salle, qui permettent d'en déterminer ultimement, très en amont d'un projet, toute son acoustique et son électroacoustique, jusqu'à pouvoir simuler, par synthèse sonore, l'écoute au siège près et pour n'importe quel type de scénario. Ces capacités de calcul et de virtualisation, additionnées à toutes les compétences de traitement numérique du signal temps-réel, ou encore, comme on l'a vu plus récemment, aux nouveaux matériaux ou parois dits intelligents ou actifs (qui sont notamment un axe prometteur actuel des travaux du LEMA-EPFL, menés par le Prof. Lissek), font que les limites en acoustique des salles ne seront bientôt plus que celles de l'imagination. En démystifiant ainsi, à travers la science désormais « contenue dans les outils eux-mêmes », la conception de l'acoustique des salles, c'est sans doute la page dite des « grands acousticiens » qui se tourne, pour une autre plus partagée et partageable finalement, moins passionnée et subjective sans doute, plus technologique et informatique incontestablement. De celle qui, par exemple, a permis récemment d'améliorer et d'affiner encore l'auditorium Stravinsky (cf. encart), ou d'affirmer, comme on pouvait s'y attendre en dépit de l'envie d'y croire, que le rayonnement acoustique d'un Stradivarius n'a en fait – contrairement à la légende volontiers propagée et sans rien enlever au génie de son créateur – rien de mieux de vraiment objectivable qu'un très bon violon contemporain. Vient donc le temps pour l'acoustique des salles, des choses qui peuvent désormais presque toutes se mesurer ou se calculer et où les résultats produits, comme en œnologie ou en pharmacologie, pour être débattus réellement sérieusement entre techniciens et spécialistes, mériteraient d'être confrontés selon la fameuse méthode du double aveugle. La seule conclusion qui vaille est celle laissée à l'appréciation la plus générale : le son ne sait pas que l'acousticien est son expert, ses seuls juges, ce sont les musiciens et le public.

Newsletter Echo Silence juin 2011 (d'Echo Silence acoustique SA), qui rend compte des travaux de rénovation réalisés 20 ans après la création de la salle : La géométrie en coupe du plafond fut modifiée afin d'y intégrer des passerelles techniques et de réduire légèrement les temps de réverbération de la salle. Une partie des coques de plafond furent remontées sur des châssis métalliques permettant ensuite d'ouvrir mécaniquement des pans de plafond (de 1 à 3 tonnes) au moyen de moteurs performants et d'une précision millimétrique. Le plafond technique, espace situé sur la salle, a été traité acoustiquement avec plus de 700 baffles acoustiques afin que cet espace devienne un aval-sons performant lorsque les coques de plafond sont ouvertes. Artisans extraordinaires œuvrant sur les poutres à 13 m du sol tels les anciens constructeurs de gratte-ciels, ils ont démonté, modifié et remonté bois et métal avec une main d'artiste. La propagation des ondes sonores depuis la scène vers le fond de la salle est également fluidifiée par la réalisation de résonateur en partie arrière des coques de paroi. Ces résonateurs, de dimensions variables, calibrés sur les fréquences à neutraliser, occupèrent les menuisiers durant beaucoup de temps !! Afin de pouvoir réaliser manuellement plus de 4 km de rainure sur des coques existantes avec des courbures variables, des prototypes furent exécutés de manière à valider une méthodologie de travail, le mode de fabrication de gabarits et toutes les modalités permettant de ne pas abîmer le placage des coques. Le fond de salle et le parapet de galerie furent également transformés afin d'augmenter leur transparence acoustique, certaines surfaces par rainurage, et d'autre par la mise-en-œuvre de panneaux acoustiques en bois perforé.

Van Lancker Eric
EPFL DE LEMA, Lausanne, Switzerland

Presented at
the 108th Convention
2000 February 19-22
Paris, France



AES

This preprint has been reproduced from the author's advance manuscript, without editing, corrections or consideration by the Review Board. The AES takes no responsibility for the contents.

Additional preprints may be obtained by sending request and remittance to the Audio Engineering Society, 60 East 42nd St., New York, New York 10165-2520, USA.

All rights reserved. Reproduction of this preprint, or any portion thereof, is not permitted without direct permission from the Journal of the Audio Engineering Society.

AN AUDIO ENGINEERING SOCIETY PREPRINT

Localization of Reflections in Auditoriums using Time Delay Estimation

Eric Van Lancker

Swiss Federal Institute of Technology of Lausanne

Ecublens CH-1015 Lausanne, Switzerland

`eric.vanlancker@epfl.ch`

Abstract

The impulse response or echogram of a hall enables its acoustic properties to be assessed. The system being studied adds the spatial dimension to this time-energy representation. The method is based on the time delay estimation between microphones of a cubic array with 25 cm edges. The paper presents the results of tests carried out in the Stravinsky Auditorium (Montreux).

Introduction

In the field of concert hall or auditorium acoustics, practitioners are led to make a judgement on the listening comfort for the audience. The impulse response or echogram represents the amplitudes and arrival times of the sound rays. The time distribution of the direct ray, the indirect rays and the diffuse sound field characterise the qualities of a hall. Unfortunately, no information on the spatial distribution of these contributions is available. The system being presented makes up for this lacuna by localizing the direct and indirect rays. The method presented in section 2 is based on Time Delay Estimation (TDE) between microphones of a cubic shaped array. The processing tools used draw on the Cross-Power Spectrum Phase (CPSP). Once the components of the various contributions have been calculated, a sorting algorithm recombines the cross-correlation peaks in order to reconstruct the wave vectors. This stage, optimised from the point of view of computation time, introduces selection criteria in relation to the costs and to constraints linked to the propagation and reception conditions (geometry, antenna size). Section 3 explains how echogram (temporal module) and localization (spatial module) interconnect to provide the spatial echogram.

The performance of the system is expressed in terms of localization precision, probability of detection and in terms of the number of contributions detected.

1 Propagation time and wave vector

In a multipath environment, such as a concert hall, the output of an array transducer, $x_m(t)$, associated with a controlled source signal, $s(t)$, can be expressed as:

$$x_m(t) = \sum_{i=0}^k \alpha_i s(t - \tau_i) + n(t) \quad (1)$$

where k is the number of reflections considered, α_i , the attenuation of the i^{th} reflection, τ_i is the corresponding path delay, and $n(t)$ is the ambient noise. The direct path is associated with $i = 0$. The time delay between transducers δ is equal to the difference of time propagation. For a microphone pair 1-2 (Fig 1):

$$\delta_{12} = (\tau_1 - \tau_2) \quad (2)$$

Each delay corresponds to the wave vector projection on the selected sensors-pair. Since M transducers distributed in 3-D space yields $M - 1$ independent relative delays, four microphones are sufficient to provide a Direction of Arrival (DOA) estimation without ambiguities. The wave vector can be derived from the delay vector $\vec{\tau}$, the relative microphone positions matrix D , and sound velocity c :

$$\vec{n} = c \cdot D^{-1} \cdot \vec{\delta} \quad (3)$$

To minimize the estimation error, it is profitable to increase the number of sensors. In this case, the system becomes overspecified and the inversion of the non-square matrix D requires least-squares techniques as the the Singular Value Decomposition (SVD) method.

2 Antenna

The antenna is a cubic-shaped array with 25 cm edges made up of 8 omnidirectional electret microphones situated at the apexes (Fig 2). The sensors in fact belong to a sphere and with such a geometry the system can operate without any a priori information on the source location.

This cubic-shaped array enables us to calculate simultaneously each of the wave vector components of four TDE, corresponding to the four parallel edges of the cube , and theoretically increase the SNR about 6dB. Furthermore, the algorithm checks that the plane wave hypothesis is verified. This coherent processing technique has demonstrated a good behavior in terms of detection performance [1]. The threshold SNR at which the correlator performance deviates from the Cramer-Rao Lower Bound (CRLB) is rejected lower. The detection performs better in low SNR conditions (e.g. reverberant environment).

The captured signals are post-processed on a PC. The acquisition chain made up of the array, the preamplifiers and A/D converters has been carefully designed to avoid any phase differences between channels.

3 Active Localization

3.1 Transmitted signal

Quazi [2] calculated the Cramer-Rao lower bound for the variance of the TDE in a case of an active system. The CRLB appears to be inversely proportional to the bandwidth cubed. This optimal bound, calculated for baseband signal, degrades when a bandpass signal is considered. Actually, low frequencies, i.e. wavelengths more than two times greater than antenna aperture, allow true peaks to be found without any ambiguities and high frequencies sharpen the peaks and give accurate estimations. Both large-band Chirp and MLS sequences were tested. The results present similar performances as long as their bandwidths are equal. At the opposite of the Chirp, the length of which is fixed for the experiment, the MLS is more flexible in regard to the segmentation and averaging steps.

3.2 Time Delay Estimation

The calculation of the $M - 1$ relative delays in 3 is performed by TDE techniques. Classified in the Generalized Cross Correlator, the Phase correlator (also called CPSP method) emphasizes the phase difference information since the cross-correlation is normalised by its magnitude. This corresponds in the Fourier Domain to the Cross Power Spectrum normalised by the Spectral Density. A modified version of the CPSP Time Delay Estimation is given by [4]:

$$\widehat{C}_{12} = \mathcal{F}^{-1} \left[\frac{X_1(\omega)X_2(\omega)^*}{(|X_1(\omega)||X_2(\omega)|)^\rho} \right] \quad 0 \leq \rho \leq 1 \quad (4)$$

where $X_m(\omega)$ is the Fourier transform of the $x_m(t)$, \mathcal{F}^{-1} represents the inverse Fourier transform, and $*$ denotes the complex conjugate. Setting ρ to zero produces the unnormalized cross-correlation, while setting it to one produces the CPSP. Optimally set by experimentation, ρ mainly varies with room characteristics (e.g. RT60) and noise level. The correlator resolution is then improved through interpolation. The three-point method, performing a parabolic interpolation around the peaks, is a very low cost (CPU) solution, as opposed to the SINC interpolation which introduces much more calculations but denotes better performances. A truncated SINC appears to be a good compromise.

3.3 Detection

After a peak-piking step expressed as:

$$\delta_{12} = \tau : \max_{\tau} \widehat{C}_{12}(\tau) \quad (5)$$

a sorting algorithm deals with delays combination to reconstruct the different contributions (direct component and reflections). The best combinations are determined according to a selection criteria including a weighted constraint on the consistence of the delays, the norm of the wave vectors and the energy of the peaks. The detection step can be enhanced with averaging of the CPSP over several successive time segments (non-coherent process) and tracking algorithms.

4 Spatial Echogram

In parallel to the localization module, the classical echogram is calculated. A peak-picking algorithm selects the peaks with most energy for each response. The peak sets for one sensors-pair are mixed in order to find relative delays verifying the physical travel time assumption. As shown in (Fig 3) for the sensors-pair 1–2, the algorithm deals with time differences of propagation sets issued from the echogram module and relative delays sets issued from the localization module. The combination of "Echogram" sets Δ and "Localization" sets δ is obtained by minimizing the Euclidian distance criterium expressed by:

$$(I, J) = \min_{i,j} \sum_{n=1}^N (\Delta_{n_1 n_2}^i - \delta_{n_1 n_2}^j)^2 \quad i, j = 1, \dots, k \quad (6)$$

where N is the number of sensor-pairs considered (2 typically), $\Delta_{n_1 n_2}^i$ is the relative delay between sensors 1 and 2 of the sensor-pair n issued from the Echogram module.

5 Experimentation

The test presented took place in the Stravinsky Auditorium in Montreux. The goal was to justify the presence of hall sound reflectors for the orchestra (Fig 4) by localizing early reflections (first 30 ms) coming from the reflectors. The trial involved a source piloted by PC (signal generation) and the cubic-shaped array. The source (5" loudspeaker) is situated backstage on a chair 50cm high and the antenna at the conductor's location 9m away from the source and 1m up from the floor. The antenna is facing the source in such a way that the direct contribution is expected at roughly Azimuth 0°. The source - antenna pair is aligned to the central reflector below it. Two extra vertical panels, disposed between the source and the antenna allow localization attempts with no direct contribution, without disturbing other reflected contributions.

The first test session, without vertical panels, allowed validation and localization precision estimation to be made. A classical Echogram based on Hadamar Transform (Fig 5), clearly shows the direct contribution followed by three major reflections. The localisation module results are shown in Figure 6. The total observation time was set to 5s, the acquisition length of each segment was fixed to 1024 samples and ρ coefficient to 0.8. The results enables us to attribute the:

- direct contribution to the source direction with an estimated precision of 1 or 2 degrees (Azimuth 1°, Elevation -4°)
- reflection $k = 1$ to the central reflector (Azimuth 1°, Elevation 47°)
- reflection $k = 2$ to both adjacents reflectors (Azimuth 329°+ 32°, Elevation 52°)
- reflection $k = 3$ to a second order reflection central reflector-floor (Azimuth 1°, Elevation -48°)
- reflection observed 1ms after the direct contribution, to a floor reflection (Azimuth 1°, Elevation -13°)

The second test session, with vertical panels hiding the source, enable more reflections to be localized. Contributions from lateral rear wall panels (Azimuth 34°, Elevation -4°), as well as third order reflections source - central reflector - floor - central reflector - antenna with (Azimuth 1°, Elevation 82°) could be identified.

6 Conclusion

The modified CPSP has demonstrated its potential to deal with a reverberant environment. Actually, the ρ coefficient allows an optimal adaptation of the localisation engine to the acoustical characteristic of the Auditorium. The spatial echogram, concatenation of the localisation module brought about by the antenna and the echogram module, corresponds to expectations. The direct contribution and five reflections have been identified. In particular, the localisation enable us to attribute the second reflection peaks ($k = 2$) of the echogram to two separate contributions arriving simultaneously at the antenna due to the symmetric disposition of the reflectors. Extra reflections have been observed by hiding the source behind panels, increasing the total observed reflections to seven contributions.

References

- [1] Jan, E., Flanagan, J.L. 1996. Sound Source Localization in Reverberant Environments Using a Outlier Elimination Algorithm. In ICSLP 1996, Philadelphia, 3.
- [2] Quazi, A.H. 1981. An Overview on Time Delay Estimate in Active and Passive Systems for Target Localization. In IASSP, 29(3), Pt 2 pp. 527-533.
- [3] Scarbrough, K., Carter, G.C., Tremblay, R.J. 1984. Implications of Threshold Effects for Coherent and Incoherent Processing Technique of Time Delay Estimation. In ICASSP 1984, 1:15.1/1-4.
- [4] Rabinkin, D.V., Renomeron, R.J., Dahl, A., French, J.C., Flanagan, J.L., Bianchi, M.H. 1986. A DSP Implementation of Source Location Using Microphone Arrays. In JASA, 99(4), Pt.2, pp. 2503

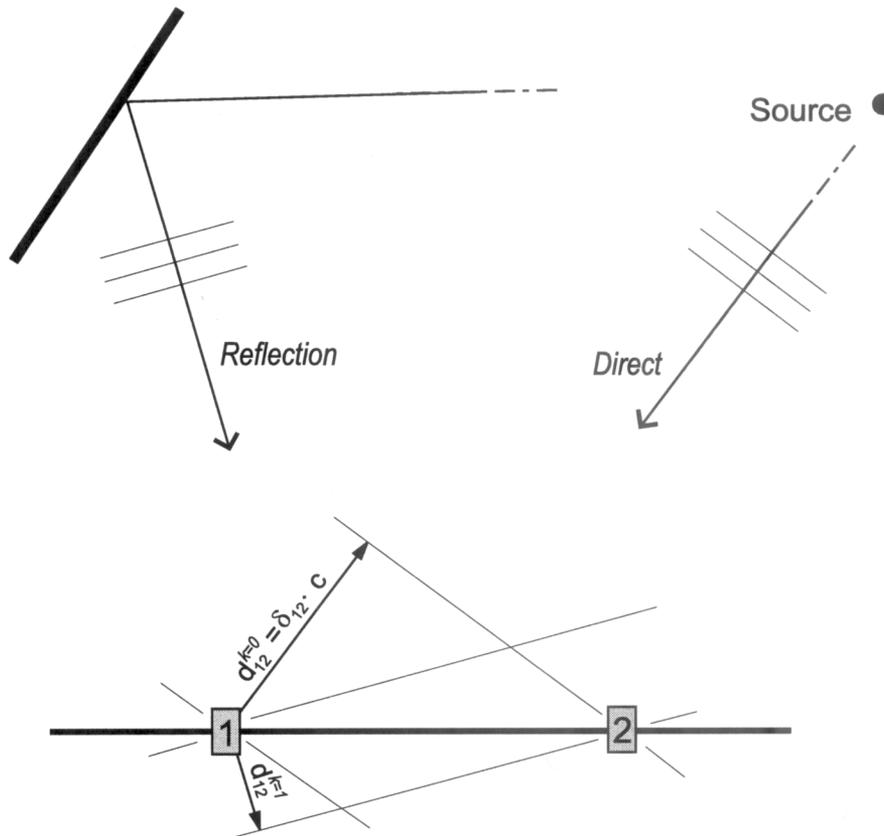


Figure 1: Direct wave, Reflections



Figure 2: Antenna in Stravinski Auditorium

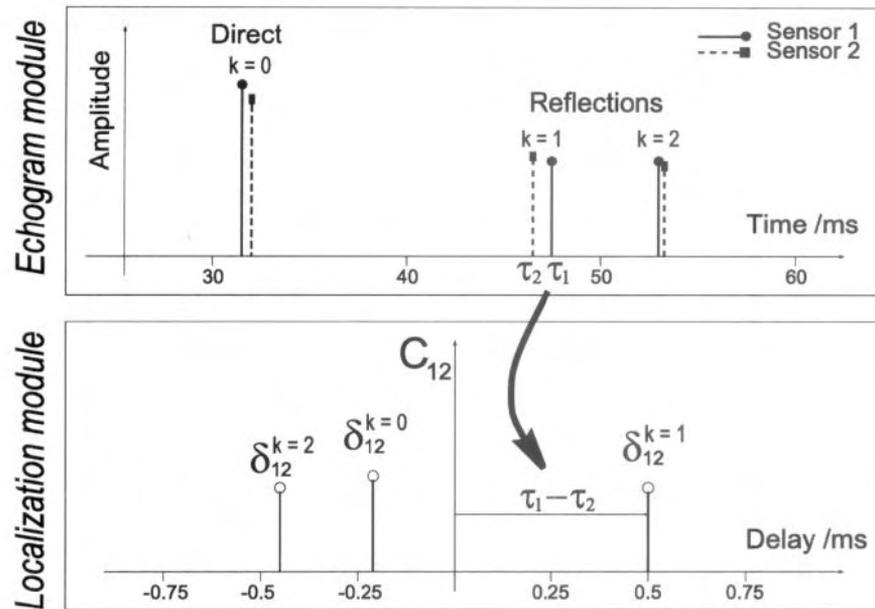


Figure 3: Contributions identification

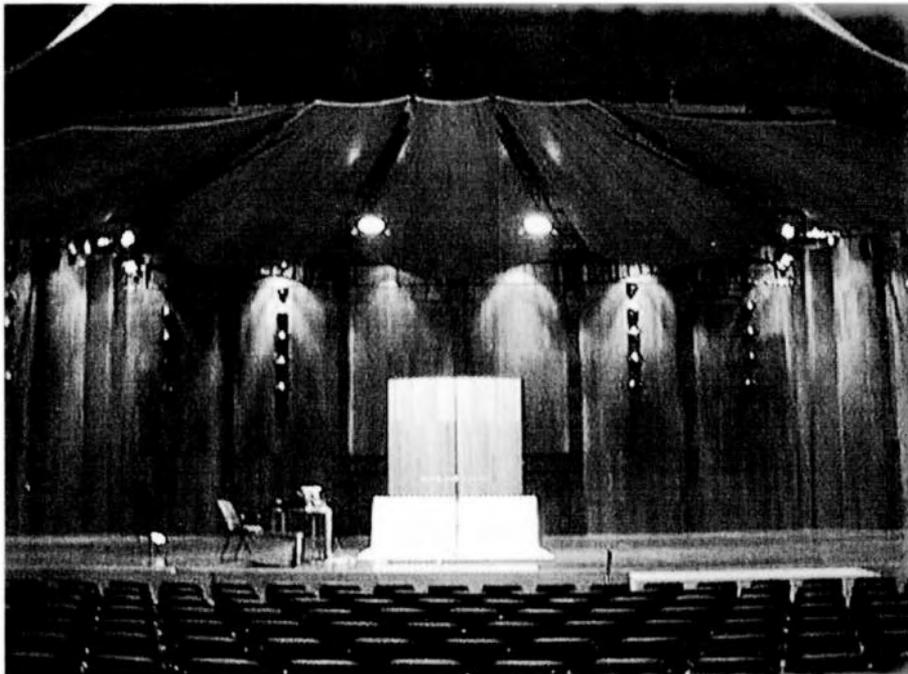


Figure 4: Orchestra sound reflectors

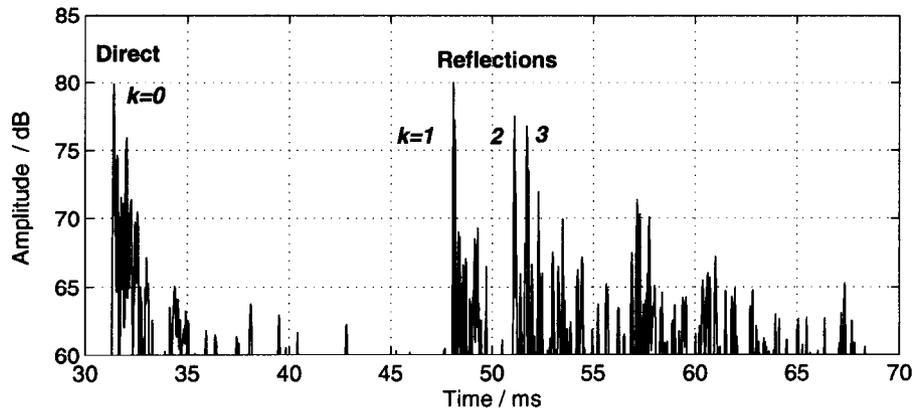


Figure 5: Echogram

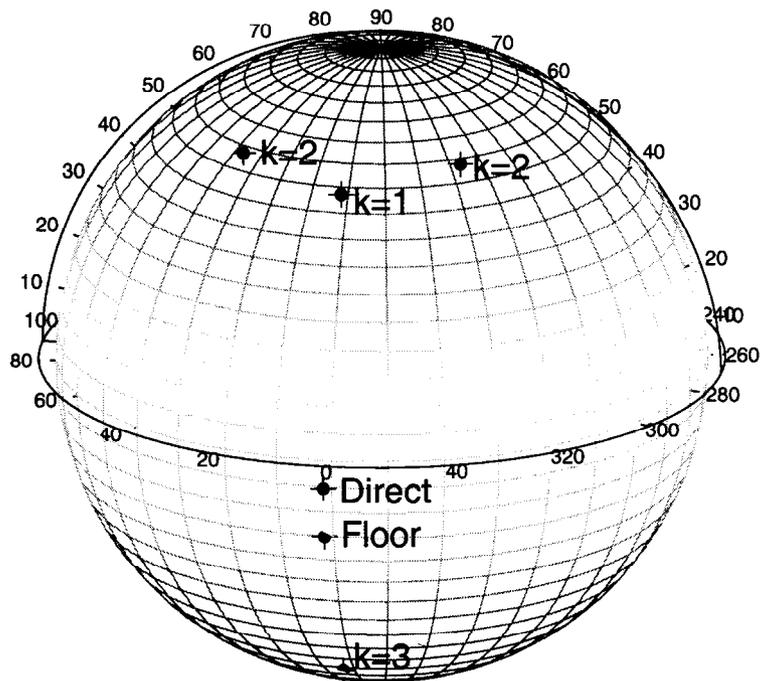


Figure 6: Localisation

LE CENTRE DE CONGRES A MONTREUX

MONTREUX - VD

Maître de l'ouvrage

Commune de Montreux,
1820 Montreux.

Architectes

Jean-Marc Jenny, EPFL-SIA,
rue du Lac 35, 1800 Vevey,
Pierre Steiner Architecture S.A.,
ch. Chantey, 1817 Fontanivent;
collaborateurs: Patrick Ruffino,
Mauro Barozzi, J.-J. Besson,
M. Woestelandt.

Ingénieurs civils

Petignat et Narbel SA,
bureau d'ingénieurs conseils,
rue de la Paix 11, 1820 Montreux;
collaborateur: Daniel Girardin

Bureaux techniques

Électricité: Betelec SA,
1010 Lausanne

Sanitaire: A.G.B.T.S.,
1845 Noville

Climatisation: Energies
Rationnelles, 1110 Morges.

Ventilation: Robert Fazan SA,
1007 Lausanne

Acoustique:

Baechli SA, 5400 Baden;
collaborateur M. Bruno Gandet.
Léma-EPFL, 1015 Lausanne,
Professeur Mario Rossi;
collaborateurs: Vincent Chritin,
Walter Koeller

Equipements Scéniques:

Max Eberhard AG, 8872 Weesen

Coordonnées

Rue Emery 2, 1820 Montreux

Conception 1986-1987

Réalisation Février 1990 -
décembre 1992

②



SITUATION

Entre lac et Grand'Rue. Le Centre de Congrès de Montreux et d'expositions-auditorium Stravinski se situe à l'entrée du centre-ville, côté Lausanne. Cet établissement constitue l'un des supports majeurs du tourisme et de l'activité économique générale de la Riviera Vaudoise. Son utilisation était toutefois et jusqu'à ce jour, limitée dans bien des domaines, les installations existantes n'offrant plus tous les services et la capacité exigées d'un tel bâtiment aujourd'hui.

Cette réalisation, extension importante de l'édifice actuel, prend place à l'ouest des volumes existants, dont elle reprend le dispositif d'assise. Construite côté est en mitoyenneté avec le centre original, elle voisine côté ouest avec le parc de Vernex.

Les limites sud et nord sont respectivement constituées par le lac et la Grand-Rue. L'entrée principale est aménagée côté ouest, permet-tant ainsi de transiter, pour accès au bâtiment, par la promenade ou le parc Vernex. En amont sont aménagés les accès de service, en liaison directe avec la voie de circulation routière principale.



PROGRAMME

Standard technique élevé. Le programme de la construction est essentiellement axé sur l'aménagement d'un auditorium de 1'800 places avec toutes ses installations et locaux annexes. Ces volumes s'inscrivent dans les 88'000 m³ SIA de cette construction bâtie sur trois niveaux souterrains préexistants. Il s'agit donc d'un développement spécifique, qui relève d'un standard de technicité et de qualité très élevé.

Différents aspects entourent la réflexion confiée aux concepteurs. Ils ont traité, plus particulièrement:

- sur le plan architectural, à l'adéquation des nouveaux et imposants volumes avec l'environnement prestigieux immédiat et éloigné dans lequel ils prennent place; à la juxta position avec l'édifice existant; à la réalisation des liaisons et cheminements extérieurs et intérieurs.
- sur le plan technique, à la satisfaction d'exigences élevées en matière d'acoustique, de techniques scéniques, de climat intérieur et d'éclairages naturels ou artificiels.
- sur le plan conceptuel: les nouveaux volumes sont appelés à des services aussi nombreux que divers; pour cette raison il est apparu d'importance que le projet soit également développé en vue d'offrir la meilleure polyvalence d'usage possible. La salle cependant a été conçue comme salle de concert à acoustique naturelle.

PROJET

Minimiser l'impact visuel. Le parti architectural-cadre adopté répond au principe suivant, lequel découle directement des conditions du programme: la salle de concert nécessitant un volume important, elle constitue le centre du dispositif général. Tous les locaux annexes sont répartis autour de cette construction principale. Ils sont réalisés en matériaux légers et transparents, et satisfont ainsi à la nécessité d'affaiblir l'impact visuel de l'ensemble: galeries aux étages, foyer et accès se trouvent donc entièrement pris

dans des volumes de verre. On obtient de ces locaux une remarquable vue sur le lac et les Alpes. La création de la salle de musique s'inscrit dans les volumes existants qui accueillent notamment scène, arrière-scène et techniques, sans provoquer de rupture entre étapes anciennes et nouvellement construites.

Ainsi, le Centre de Congrès propose-t-il une belle homogénéité des constructions, lesquelles résultent pourtant de trois extensions successives.

On accède à l'entrée principale, via le parc Vernex, en façade ouest. Pour le service, on a prévu une entrée directe



④

③

côté nord, en liaison immédiate avec la Grand'Rue.

Sur le plan technique, le bâtiment est constitué d'une structure porteuse métallique rapportée sur les volumes sou-terrains existants. Cette particularité a nécessité le renforcement ponctuel des fondations par reprise en sous-oeuvre, travail d'autant plus délicat qu'il s'effectuait au voisinage du lac.

Les supports horizontaux sont constitués de dalles en béton armé, précontraint lorsque les portées l'exigent, notamment pour la salle de musique. Les toitures plates font appel à des éléments préfabriqués, isolés et étanchés mono-couche.

En façade, trois systèmes différents ont été retenus, fonction des locaux ainsi délimités :

- façade vitrée à double peau, avec ouvrants pour nettoyage, incorporant des stores d'obscurcissement.
- façade traditionnelle avec porteur béton, brique de doublage et isolation périphérique.
- façades ventilées, composées soit de maçonnerie en plots de ciment, soit de béton, d'une isolation et d'un revêtement céramique,
- appliqué sur sous-construction métallique.

Les études d'acoustique ont particulièrement déterminé le choix de certains matériaux intérieurs: moquettes dans les locaux annexes, parquet Balata sur sous-couche en sapin pour la salle de musique dont les murs sont également parés de bois, tout comme le plafond sus-pendu auto-portant. La salle des pas perdus est garnie de béton apparent, partiellement isolé phoniquement. Deux ascenseurs panoramiques desservent les étages et un monte-voiture permet l'accès aux sous-sols. Le refroidissement est obtenu par circulation d'eau pompée au lac et les installations électriques nécessitent plusieurs sous-stations.

Photos

1 et 4 Aspect général: le nouveau bâtiment et son environnement.

2 Façade principale côté nord-est.

3 Vue général depuis le lac.

5 à 9 Unité conceptuelle et expressions diversifiées: l'ensemble nouvellement construit présente, à l'intérieur également, la signature d'une belle homogénéité dans la qualité du traitement architectural.

Caractéristiques générales

Surface terrain:	9'200 m ²
Surface brute planchers:	8'000 m ²
Emprise au rez:	4'000 m ²
Volume SIA:	88'000 m ³
Prix total:	Fr. 50'500'000.--



⑤



⑥

L'ACOUSTIQUE

L'acoustique naturelle d'une salle dépend en premier lieu de son volume et de sa forme. Le volume conditionne la réverbération, phénomène de prolongation du son perceptible par chacun. La réverbération optimale d'une salle symphonique requiert un volume d'environ 10 m³ par auditeur. Aussi l'Auditorium Stravinski présente-t-il un volume d'environ 18'000 m³ pour ses 1'800 auditeurs. La forme conditionne deux phénomènes essentiels: les premières réflexions et la diffusion du son dans la salle. La forme, donc les proportions de la salle, résulte de ces considérations et du choix de son plan (nombre et répartition des auditeurs, situation et dimensions de la scène, disposition et inclinaison des gradins, etc.).

Les premières réflexions déterminent la qualité d'écoute : un auditeur doit recevoir non seulement un son direct de chaque musicien ou chanteur, mais encore de bonnes et fortes réflexions survenant avec de tout petits retards (au plus 30 millisecondes). Si ces retards étaient plus grands, on aurait une dégradation de la qualité d'écoute, voire des échos.

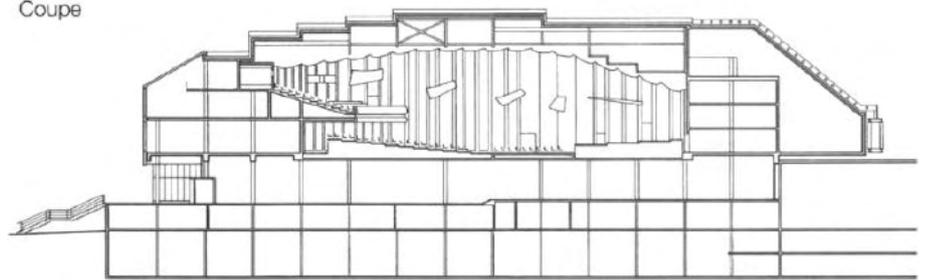
Dans l'Auditorium Stravinski, les acousticiens ont habillé parois et plafonds de

grandes vagues de bois remplissant plusieurs fonctions: absorption des sons graves; réflexion et diffusion des sons moyens et aigus. Grâce à leur profil soigneusement étudié, les vagues des parois procurent aux auditeurs situés dans leur voisinage de fortes premières réflexions.

La conception et la réalisation des vagues - matériaux, forme, mode de fixation, etc. - ont fait l'objet de beaucoup de soins. Tous les prototypes ont été mesurés en salle réverbérante, de manière à optimiser leurs performances. La réverbération voulue dans les fréquences graves est obtenue par les effets conjoints des vagues et de caissons résonateurs logés dans les espaces entre vagues.

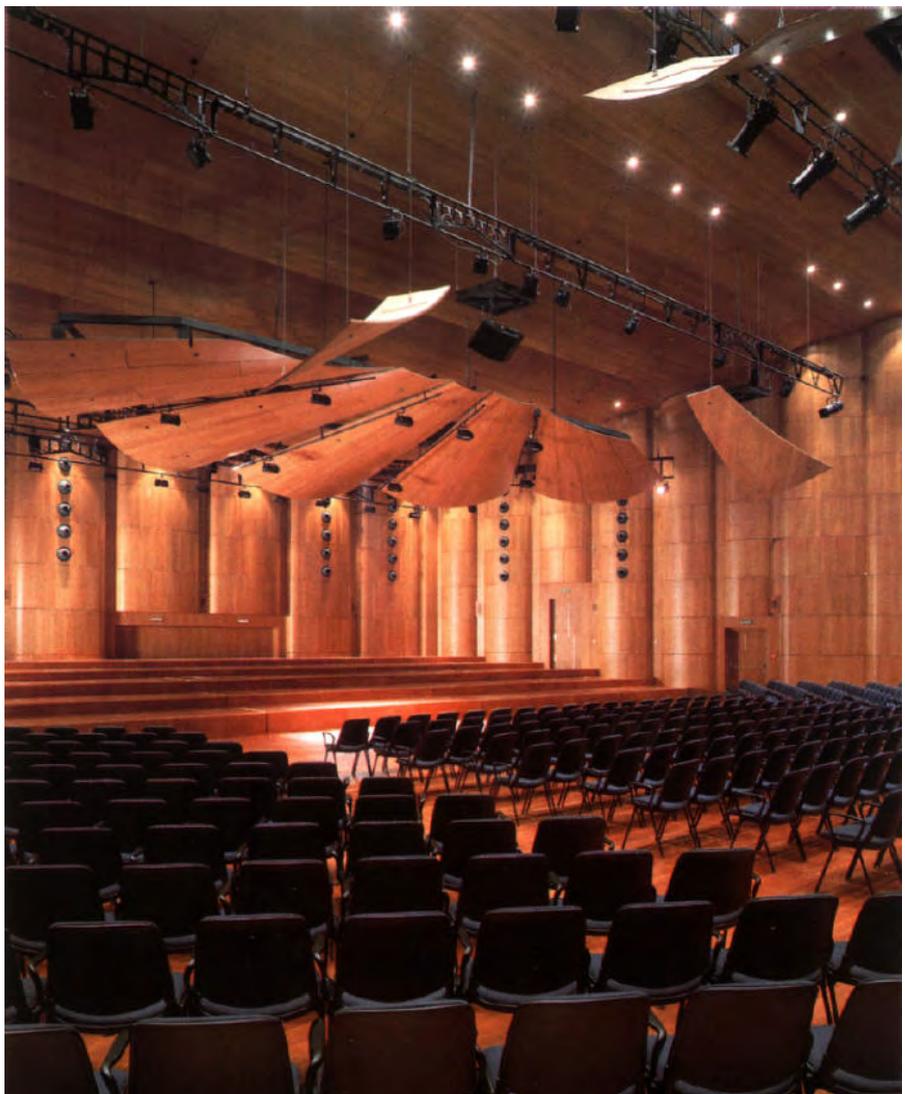
Les abat-son suspendus dans l'auditorium ont pour but de donner de fortes réflexions aux auditeurs situés dans l'axe de la salle, donc trop éloignés des parois pour que les réflexions sur ces dernières leur parviennent assez tôt. Un autre abat-son a été placé au-dessus de la scène, de manière à permettre une bonne cohésion orchestrale par de fortes premières réflexions pour les musiciens et le chef d'orchestre. Le plafond au-dessus de la scène devant être très haut pour satisfaire certaines exigences (grill technique), il ne pouvait en effet à lui seul remplir cette fonction acoustique. Les profils et les emplacements des vagues des parois et des abat-son ont été déterminés par des essais en ultrasons dans une maquette au vingtième de l'Auditorium.

Coupe



⑦





Le choix des sièges était aussi important que celui des parois et du plafond: aux fréquences moyennes et aiguës, se sont le public et les sièges qui déterminent la réverbération. Les fauteuils devaient par conséquent présenter une absorption du son appropriée variant peu, occupés ou non. Ce choix était d'autant plus délicat qu'ils devaient être empilables en vue de leur rangement hors de la salle. Aussi ont-ils été réalisés spécialement pour l'Auditorium, après études et mesures de prototypes en salle réverbérante.

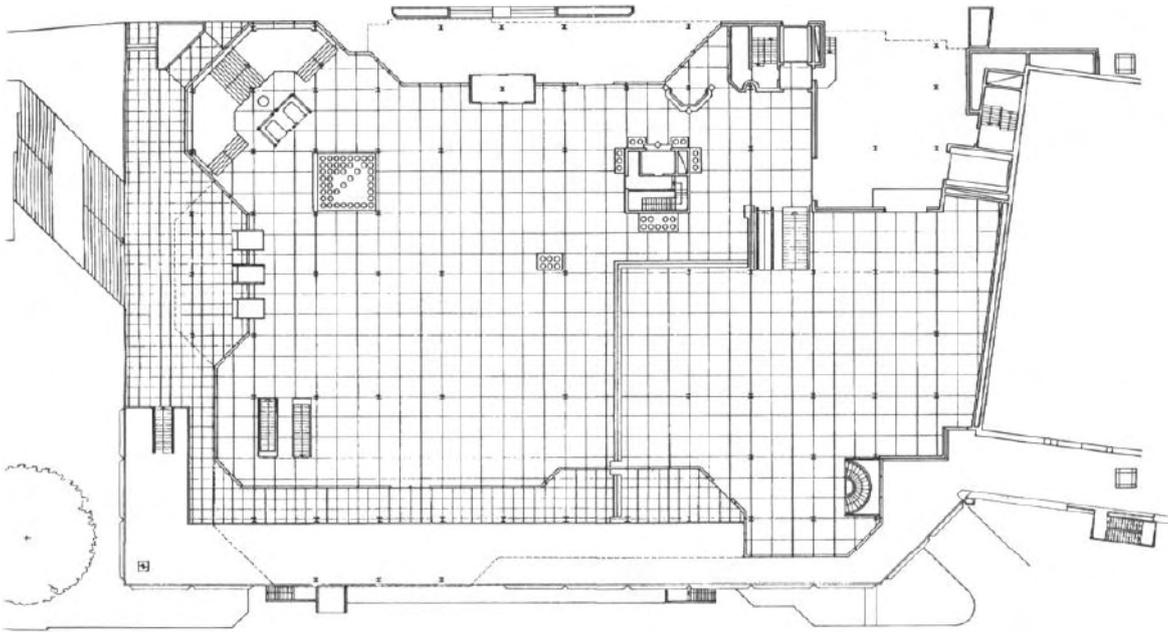
Des dispositions de protection contre les bruits ont également dû être prises. L'isolation de la façade, des fenêtres et du toit protège des bruits extérieurs - en particulier ceux de la Grand-Rue. Des éléments de construction appropriés pour les parois, sols, plafonds, portes, fenêtres réduisent les bruits intérieurs, aériens ou solidiens. Enfin, des dispositions anti-bruits ont été appliquées aux installations et équipements techniques, en particulier au système de ventilation de l'Auditorium.

Tous ces problèmes ont été résolus de façon magistrale et le résultat final est celui escompté par la ville de Montreux: une acoustique naturelle idéale pour la musique symphonique.

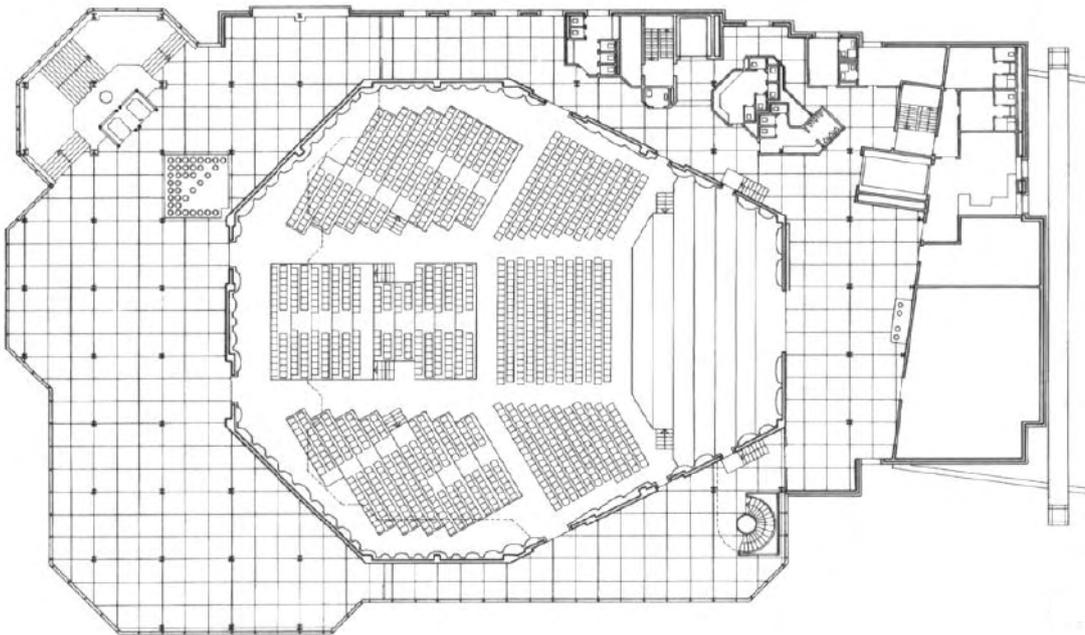
⑧

⑨

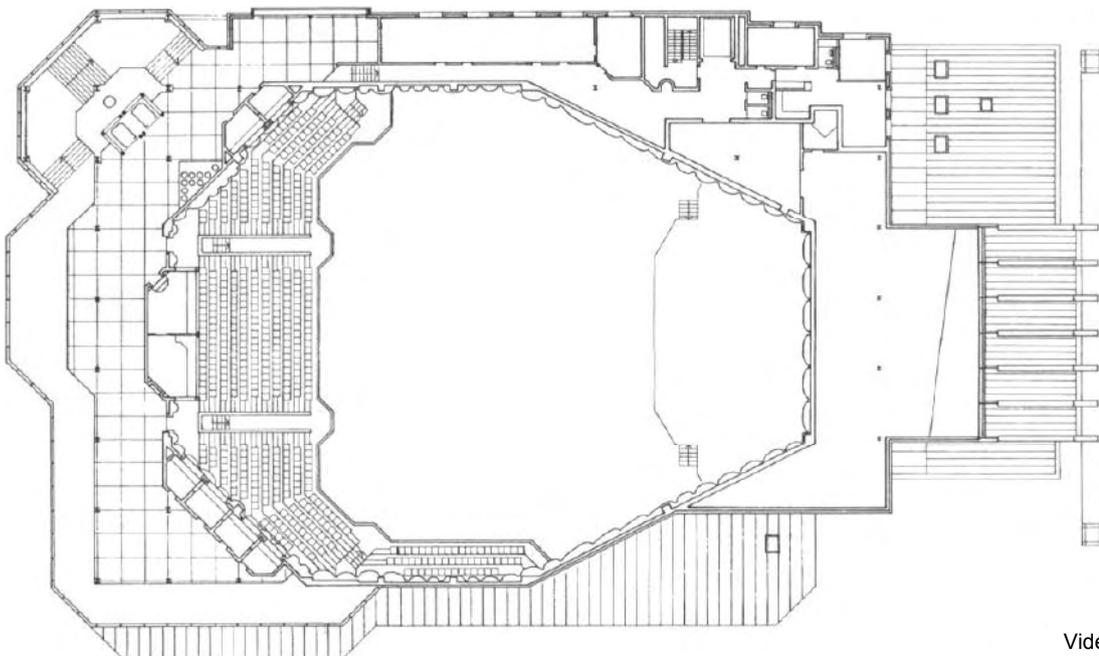




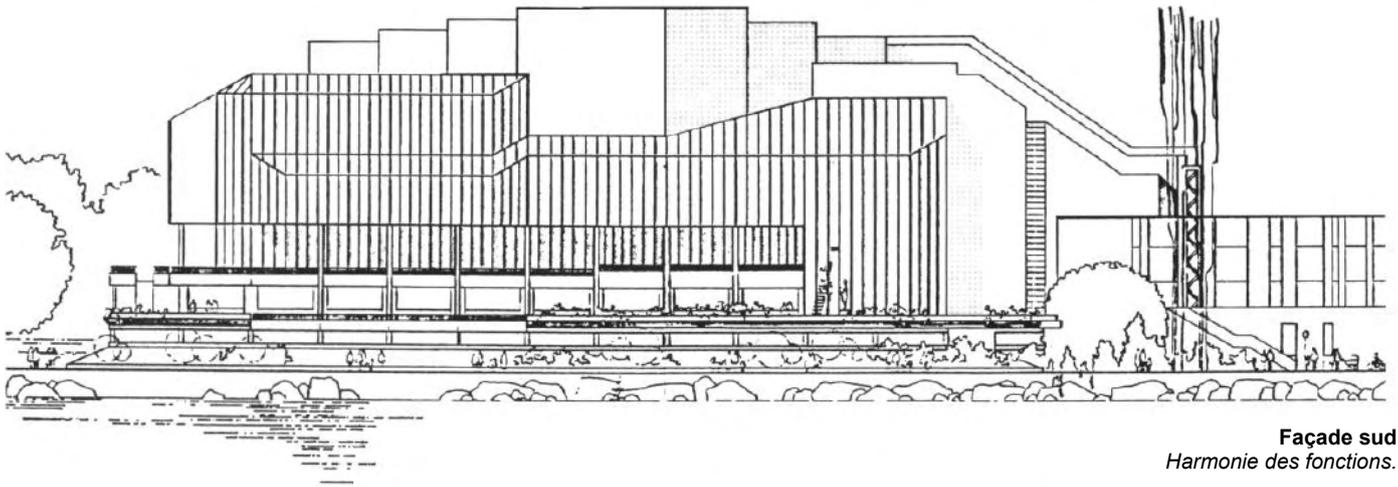
L'espace d'entrée
hall - exposition - expos



Exposition - salle de concert



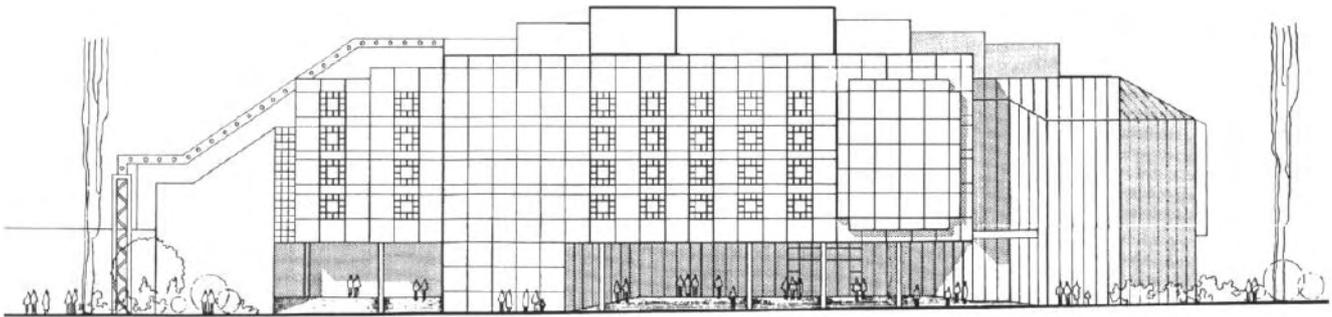
Vide sur exposition salle de concert



Façade sud

Harmonie des fonctions.

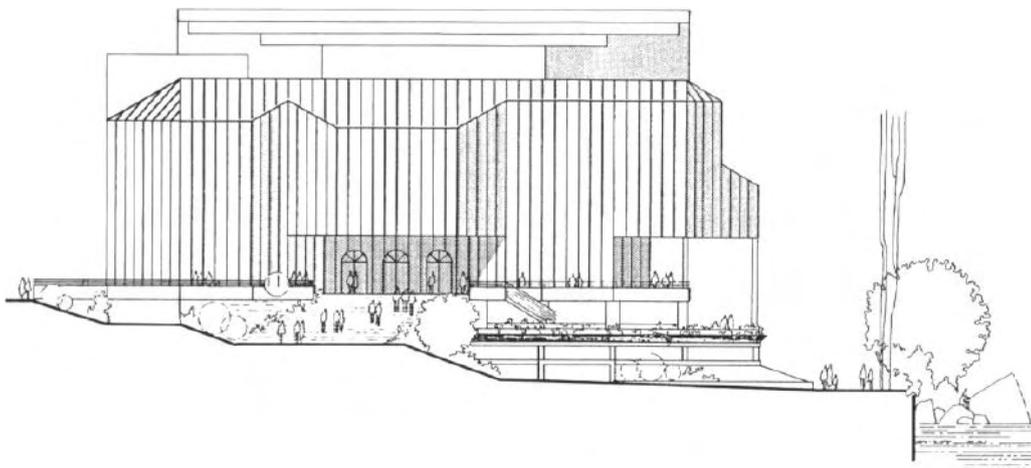
Au sud, le Centre est ouvert sur le lac et sur le Parc de Vernex. Eau et verdure. Calme et espace.



Façade nord

Harmonie des formes.

Les surfaces et les volumes par leur équilibre, le verre par ses jeux de miroirs, concourent à intégrer l'ensemble dans le tissu urbain existant.



Façade ouest

L'ouverture sur le parc.

L'accès principal est comme un aboutissement du remarquable Parc de Vernex, encore valorisé par la vue qu'offrent les terrasses et les galeries vitrées.

Maçonnerie	W.R. Constructions S.A. - Finger S.A. , p.a. W.R. Constructions S.A., 1814 La Tour-de-Peilz	Serrurerie fenêtres	Balco S.A. 1880 Bex
Electricité	Consortium S.R.E. - Rhônelectric-Fürst p.a. S.R.E., 1815 Clarens	Isolation des conduites	Schneider Isolations S.A. 1004 Lausanne
Sanitaire	Consortium Burkhalter S.A. - Giovanna S.A. - Lauffer S.A. - Konic S.A. et Heimann. p.a. Entreprise Giovanna S.A., 1815 Clarens	Menuiserie intérieure portes	Ego-Kiefer S.A. 1844 Villeneuve
Chauffage	Consortium Burkhalter S.A. - Giovanna S.A. - Lauffer S.A. - Konic S.A. et Heimann. p.a. Entreprise Lauffer S.A., 1816 Chailly	Menuiserie	Entreprise R. Décosterd 1860 Aigle
Plâtrerie, peinture, Isolation	Entreprise Lombardo 1820 Montreux	Sols sans joint	Weiss + Appetito S.A. 1020 Renens
Régulation	Johnson Controls S.A. 1217 Meyrin 2	Protection contre la foudre	Perusset Lausanne S.A. 1020 Renens
Ventilation	Consortium Wirz-Roos p.a. Entreprise Wirz, 1007 Lausanne	Echafaudages	R. Richard et Fils 1800 Vevey
Détection incendie	Cerberus S.A. 1095 Lutry	Construction métallique	Zwahlen & Mayr S.A. 1860 Aigle
Eclairage de secours	Sirat S.A. 1000 Lausanne 20	Nettoyage	CAH Nettoyage 1820 Montreux
Traduction simultanée, sonorisation d'ambiance	Entreprise Martano 1817 Fontanivent	Exutoires de fumée	Sicli Matériel-Incendie S.A. 1000 Lausanne 9
Vernière double peau	Félix Constructions S.A. 1030 Bussigny	Coupe-feu	Stopflammes S.A. 1004 Lausanne
Serrurerie courante	A. Taroni Fils 1815 Clarens	Stores	Schenker Stores S.A. 1052 Le Mont-sur-Lausanne
Revêtement Kéraïon	Entreprise Toitures & Ferblanterie S.A. 1800 Vevey	Ascenseurs	Vauthey-Lift S.A. 1805 Chexbres
Etanchéité terrasse	Entreprise Perroud S.A. 1800 Vevey	Lustre	Régent S.A. 1052 Le Mont-sur-Lausanne
Etanchéité toiture et placage en cuivre	Consortium Heimann-Paillex p.a. F. Heimann, 1800 Vevey	Cuisine	Entreprise Reymond Zermatten 1820 Montreux
Tableaux électriques	Hirsiger S.A. 1110 Morges	Pose préfabriqués + bacs	Entreprise Biasini S.A. 1815 Clarens
Moquette	A. Jordan & Fils 1800 Vevey	Sonorisation salle de musique	Consortium Mafiolý S.A. - Audio Performances S.A. p.a. Mafiolý S.A., 1815 Clarens
Chapes	Euboolith SA 1800 Vevey	Fourniture d'horloges	Entreprise Bodet Promatic S.A. 2852 Courtételle
Chape-dallage	Entreprise Ch. Payot 1815 Clarens	Fermatures de sécurité	Entreprise Misteli & Baur 1000 Lausanne 16
Parquet	Blanc & Cie S.A. 1860 Aigle	TV circuit fermé, appel recherche de personnes	Entreprise Téléphonie S.A. 1000 Lausanne 13
Faux-plafond métallique	Werner-Isolations S.A. 1004 Lausanne	Menuiserie banques et bureaux	Entreprise Wider 1815 Clarens
Revêtement salle, murs et plafond, menuiserie portes salles	Consortium Lignoform-Schneider , p.a. Entreprise Lignoform, 8717 Benken	Faux-plancher	Entreprise Lenzlinger Söhne A.G. 8610 Uster 1
Aménagement scénique	Entreprise Eberhard 2016 Cortaillod	Préfabriqués	BTR PREBETON S.A. 1023 Crissier
Carrelage	Carrelages Riviera S.A. 1820 Montreux	Journal lumineux	NEON LUMIERE S.A. 1018 Lausanne 18
		Sièges salle de musique	COMFORTO-SYSTEMES S.A. 2900 Porrentruy
		Eclairage scénique	MAYLIGHT S.A. 1095 Lutry
		Canaux de sol	TEMSA 1219 Châtelaine-Genève